

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI

KATEDRA OPTIKY

**BENHAMOVA ILUZE: VNÍMÁNÍ SUBJEKTIVNÍCH BAREV**

Diplomová práce

VYPRACOVALA:

Renáta Heinzová

obor 5345T008 OPTOMETRIE

studijní rok 2015/2016

VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE:

Prof. RNDr. Miloslav Dušek, Dr.

**Čestné prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala sama pod vedením Prof. RNDr. Miloslava Duška, Dr. za použití literatury uvedené v závěru práce.

Ve Vacanovicích dne 20.07.2016

.....

Renáta Heinzová

**Poděkování:**

Děkuji Prof. RNDr. Miloslavu Duškovi, Dr. za vedení a rady. Také RNDr. Mgr. Františku Pluháčkovi, Ph.D., mé rodině a všem, kteří mě v průběhu psaní práce podporovali.

Tato práce byla vytvořena za podpory projektu IGA PřF UP v Olomouci s názvem "Optometrie a její aplikace", č. IGA\_PrF\_2016\_015.

# OBSAH

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| ÚVOD .....                                                   | 6  |
| 1. SÍTNICE A ZRAKOVÁ DRÁHA .....                             | 7  |
| 1.1. Zraková dráha.....                                      | 9  |
| 2. VNÍMÁNÍ BAREV A PORUCHY BARVOCITU .....                   | 11 |
| 2.1. Teorie vnímání barev .....                              | 12 |
| 2.2. Poruchy barvocitu .....                                 | 13 |
| 3. HISTORIE BENHAMOVA KLAMU .....                            | 15 |
| 3.1. Benhamův disk.....                                      | 16 |
| 4. VLIV URČITÝCH PARAMETRŮ NA VJEM SUBJEKTIVNÍCH BAREV ..... | 17 |
| 4.1. Rychlost a směr otáčení disku .....                     | 17 |
| 4.2. Vliv osvětlení .....                                    | 18 |
| 4.3. Tloušťka, délka a rozmístění čar .....                  | 19 |
| 4.4. Barva a uspořádání pozadí.....                          | 21 |
| 4.5. Subjektivní barvy při poruše barvocitu .....            | 22 |
| 5. TEORIE A MODEL Y .....                                    | 24 |
| 5.1. Kódování barevného signálu a stacionární vzor .....     | 24 |
| 5.2. Laterální interakce na sítnici .....                    | 25 |
| 5.3. Matematické modely.....                                 | 26 |
| 6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....                                 | 28 |
| 6.1. Úvod.....                                               | 28 |
| 6.2. Metodika .....                                          | 28 |
| 6.2.1. Pilotní experimenty .....                             | 30 |
| 6.3. Popis a výsledky experimentů.....                       | 31 |
| 6.3.1. Experiment 1.....                                     | 32 |
| 6.3.2. Experiment 2.....                                     | 38 |
| 6.3.3. Experiment 3.....                                     | 41 |
| 6.3.4. Experiment 4.....                                     | 42 |

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 6.3.5. Experiment 5.....           | 44 |
| 6.3.6. Doplnující experimenty..... | 50 |
| 6.4. Diskuze .....                 | 51 |
| ZÁVĚR .....                        | 54 |
| LITERATURA.....                    | 56 |

# ÚVOD

Benhamova iluze patří mezi fyziologické klamy, tzn. chyby ve zrakovém vnímání, které vznikají převážně vlivem anatomie a fyziologie oka a zrakové dráhy. Jedná se o iluzi barev, kterou vyvolává achromatický podnět. Je pozorována a zkoumána již skoro 200 let, přičemž se stále s jistotou neví, jak a kde přesně ve zrakovém aparátu vzniká. Důvody ke zkoumání iluzí jsou především snahy porozumět fungování lidského zrakového systému z hlediska psychofyziologie. Nebo využít jev z praktického hlediska, například jako diagnostickou metodu u některých onemocnění sítnice.

Na začátku práce je objasněna struktura sítnice a zrakové dráhy, protože oblast sítnice je považována za hlavní místo vzniku Benhamovy iluze. Během pozorování tohoto klamu vzniká vjem tzv. subjektivních barev, totiž barev, které jsou jen zdánlivé, proto je stručně popsána problematika barev a jejich vnímání lidským okem. Práce se věnuje objevení iluze a jejím prvním pozorováním. Vliv různých parametrů je uveden v následující kapitole, jelikož subjektivní barvy mohou být ovlivněny různou intenzitou či vlnovou délkou osvětlení, strukturou a barvou černo-bílého obrazce, atd. V práci jsou představeny některé teorie, často předkládané a dále ověřované, a matematické modely snažící se jev objasnit.

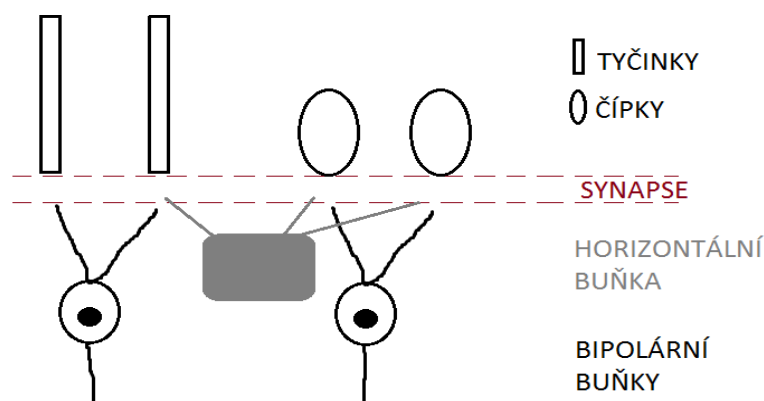
Praktická část práce zahrnuje pozorování iluzorních barev za různých podmínek. Jak už bylo řečeno, pozorovací podmínky a struktura obrazce mají na vjem iluze velký vliv. Proto byl zkoumán vliv osvětlení, konstrukce černo-bílého vzoru (poloha, délka, tloušťka čar a další) a v neposlední řadě také rychlost či směr otáčení disku.

Cílem práce je shrnout dosavadní poznatky o Benhamově iluzi a subjektivních barvách z uvedené literatury v teoretické části práce. V rámci praktické části ověřit některé vybrané poznatky a zjistit mezní rychlost otáčení černo-bílého kotouče, při které iluzorní barva mizí.

# 1. SÍTNICE A ZRAKOVÁ DRÁHA

Místo vzniku Benhamovy iluze bývá přisuzováno interakcím probíhajícím na sítnici, nervovým buňkám zrakové dráhy a procesům v mozku. Zmíněná problematika bude stručně popsána v této kapitole. Pro její pochopení je nutná znalost termínu neuron, což je nervová buňka. Neurony jsou propojeny svými výběžky, kterými vytváří tzv. synapse [1]. Existují dva typy výběžků. Každý neuron přijímá signál pomocí dendritů (může být jeden nebo více) a k dalším buňkám ho přenáší jediným neuritem, na který navazuje nervové vlákno tvořené axonem a obalem [1].

Sítnice se nachází na vnitřní stěně oční koule. Její optická část se skládá z několika vrstev buněk, které jsou vzájemně propojené pomocí synapsí. První vrstvu tvoří pigmentový epitel, na který navazují světločivé buňky neboli fotoreceptory, tyčinky a čípky. V oku se nachází asi 120 milionů tyčinek, které umožňují vidění za šera. Čípků je 6 až 7 milionů, umožňují rozlišování barev a vytvoření ostrého obrazu. Ve fotoreceptorech se mění světelná energie (z dopadajících paprsků) pomocí chemických procesů v elektrickou energii. Ta je vedena přes bipolární buňky, které tvoří první neuron zrakové dráhy, ke gangliovým buňkám představujícím druhý neuron zrakové dráhy. Vlákná gangliových buněk pak vytváří optický nerv. V sítnici se nacházejí také podpůrné a asociační buňky. Mezi asociační buňky patří horizontální a amakrinní. Leží ve stejné vrstvě jako bipolární buňky, jejich úloha však není úplně objasněna. Zatímco fotoreceptory, bipolární a gangliové buňky propojují jednotlivé vrstvy sítnice ve směru vertikálním, buňky horizontální a amakrinní vedou vzruchy kolmo na tento směr. Horizontální buňky propojují několik fotoreceptorů a zároveň zasahují do synapsí mezi fotoreceptory a bipolárními buňkami (obr. 1). Zvláštností je, že horizontální buňky se spojují svými dendrity s čípky, avšak neurity tvoří synapse s tyčinkami. Amakrinních buněk je několik typů. Vytváří spojení mezi synapsemi bipolárních a gangliových buněk. [1; 2; 3]



Obr. 1 – Spojení fotoreceptorů, horizontálních a bipolárních buněk

Místo nejostřejšího vidění na sítnici se nazývá žlutá skvrna (macula lutea). V této oblasti jsou čípky velmi hustě uspořádány a v jejím centru je každý čípek spojen jen s jednou bipolární buňkou a s jednou gangliovou buňkou. V ostatních částech sítnice směrem k periférii připadá na jednu gangliovou buňku více bipolárních buněk, které jsou napojeny na více fotoreceptorů. Jednu gangliovou buňku může tudíž aktivovat větší množství receptorů a soubor těchto receptorů tvoří receptivní pole gangliové buňky (gangliových buněk je v lidském oku asi 1 milion, fotoreceptorů asi 130 milionů). Jedná se tedy o oblast sítnice, která při stimulaci aktivuje daný neuron. I ostatní neurony zrakové dráhy mají svá receptivní pole (čím výše ve zrakové dráze, tím složitější) a vzájemně se překrývají. Slouží k detekci detailů (např. okraje), směru pohybu pozorovaného objektu, apod. Receptivní pole gangliových buněk jsou zhruba kruhovitá a rozlišujeme na nich centrum a periférii (většinou mají opačný účinek). On-centre receptivní pole aktivuje příslušnou gangliovou buňku při osvětlení centra a při osvětlení periferie buňku naopak utlumí. Stimulace centra u off-centre receptivního pole buňku utlumí a stimulace periferie naopak aktivuje. Existují také buňky tzv. barevně oponentní (colour opponent), jejichž receptivní pole reaguje na dvě vzájemně doplňkové barvy, např. modrá barva buňku aktivuje a žlutá inhibuje. Je jich více druhů, mohou mít také centrum a periférii, kdy osvětlení centra modrou barvou působí aktivaci, zatímco žlutou útlum (v periférii mají opačný vliv). Nebo reagují jen na jednu barvu, která buňku dráždí nebo tlumí podle místa stimulace. Patří sem např. gangliové buňky nebo neurony v corpus geniculatum laterale. [2; 3; 4]

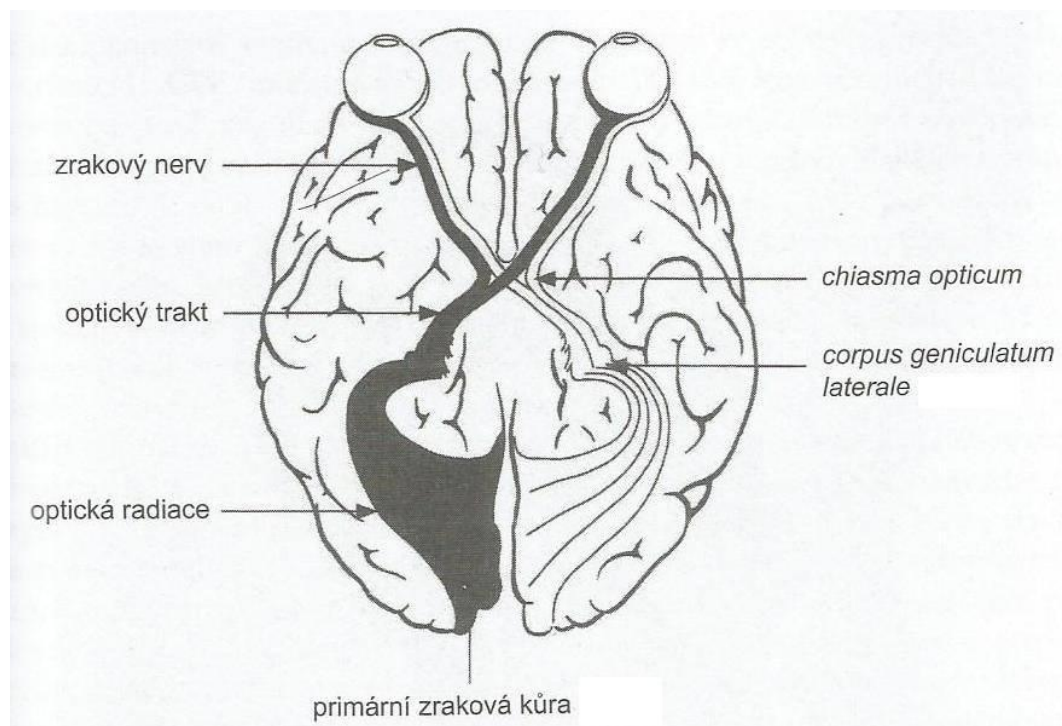
Důležitou úlohu při šíření signálu sítnicí hraje laterální inhibice, která je označovaná za jeden z vlivů vzniku Benhamovy iluze. Jedná se o efekt zvýrazňující kontrastní hranice obrazu. Působí v oblasti synapsí sítnice, v corpus geniculatum laterale

i mozkové kůře. Např. fotoreceptory se mohou vzájemně ovlivňovat – zvyšovat či snižovat signál sousedícího receptoru. Pokud dopadá na dva sousední receptory stejné množství světla, působí na sebe stejnou měrou, což značí jednotný stimul. Když je jeden fotoreceptor stimulován intenzivněji, má větší vliv na druhý fotoreceptor a způsobuje zeslabení jeho signálu. Druhý fotoreceptor sice na první působí také, avšak méně. Odezva prvního receptoru je tudíž větší, což signalizuje kontrastní hranici. [2]

Obraz pozorovaného předmětu je promítnut na sítnici stranově a výškově převrácený, zmenšený, deformovaný kvůli fyziologickému prohnutí sítnice a je pouze dvojrozměrný. Velikost sítnicového obrazu se vyjadřuje pomocí zorného úhlu. Počítá se z velikosti předmětu a vzdálenosti předmětu od pozorovatele. Sítnicové obrazy se vytváří oběma očima, v jeden celek jsou spojeny až v mozku, kde se však také mísí vlivy zkušenosti, inteligence, apod. [5; 6]

### **1.1. Zraková dráha**

Zraková dráha je nervová dráha propojující buňky sítnice a mozková centra, je vyobrazena na obr. 2. Skládá se ze tří neuronů. Jak bylo popsáno, první dva neurony se nachází na sítnici a představují je bipolární a gangliové buňky. Vlákná gangliových buněk vychází z oka do orbity a pokračují do lebky až po primární zrakové centrum (*corpus geniculatum laterale*). Tvoří optické nervy, jejichž vlákna se za vstupem do lebeční dutiny částečně kříží v *chiasma opticum*. Kříží se pouze vlákna z nazálních polovin sítnic a 62 % vláken ze žluté skvrny, ostatní vlákna se v *chiasmatu* nekříží a pokračují dále po stejné straně. Od *chiasmatu* označujeme nervová vlákna vedoucí do *corpus geniculatum laterale* jako optické trakty, kdy levý trakt obsahuje vlákna z levých polovin sítnic a pravý trakt vlákna z pravých polovin obou sítnic. Třetí neuron zrakové dráhy začíná v *corpus geniculatum laterale* a ve formě Gratioletova svazku se zanořuje do zrakového centra v korové oblasti mozku (*area 17*) ve *fissura calcarina*. Některá vlákna jsou přepojena do dalších oblastí mozku, kde dochází k propojení s dalšími např. smyslovými centry. Jiná vedou z kůry zpět do primárního zrakového centra, kde mohou ovlivňovat např. rozlišovací schopnost oka. [1; 3]



Obr. 2 – Zraková dráha [5]

Nervová vlákna vedená zrakovou dráhou mají určité uspořádání, retinotopickou organizaci. Souvisí s přenosem informací ze sousedících vrstev sítnice. Tyto vzruchy jsou vedeny zrakovou dráhou pospolu tak, aby byl zachován přenos obrazu promítaného na sítnici až do týlního laloku. Ve zrakové kůře je stále zachováno uspořádání vláken jako na sítnici. Na pravou stranu fissura calcarina jsou vedena vlákna z pravých polovin sítnic, doleva z levých polovin. Periferní vlákna jsou více vpředu, makulární v zadní části týlního laloku, na pólu. Vlákna z horních částí sítnice jsou vedena nad fissuru a z dolních pod ni. Jelikož je buněk mozkové kůry mnohem více než nervových vláken, mohou být makulární vlákna zpracovávána s větší přesností. [1; 5]

Existují také dvě zrakové dráhy označované jako parvocelulární a magnocelulární. Parvocelulární systém sbírá informace z menších receptivních polí sítnice, tudíž z centrální oblasti. Je pomalejší a slouží především k rozpoznávání tvarů a barev. Pravděpodobně odpovídá za vznik Benhamovy iluze. Magnocelulární dráha se naopak vyznačuje velkými receptivními poli. Umožňuje detekci pohybu. [4; 5]

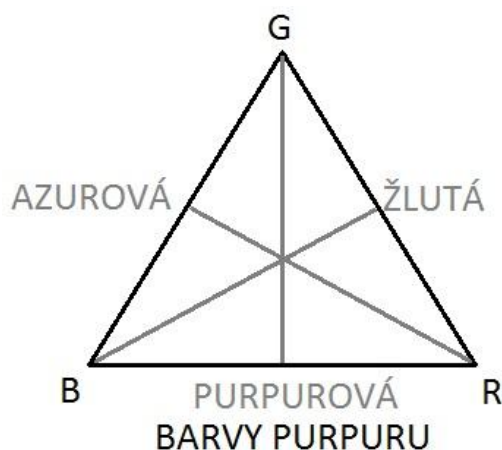
## 2. VNÍMÁNÍ BAREV A PORUCHY BARVOCITU

Jak už bylo řečeno, ve fotoreceptorech dochází k reakcím měnícím světlo na nervové impulzy. To se děje díky pigmentu, který obsahují. Čípky dělíme na tři typy, jelikož obsahují barvivo různě citlivé na světlo krátké, střední a dlouhé vlnové délky (tedy na světlo různé barvy). Světlo dopadající na sítnici vykazuje určitou intenzitu a skladbu spektra, které vyvolají příslušnou reakci v podobě receptorového potenciálu. Na základě odpovědi každého ze tří druhů čípků vytvoří zrakový systém barevný vjem. Přičemž oko reaguje na světlo v tzv. viditelné oblasti spektra (přibližně 360–760 nm). Barevné vnímání je subjektivní, avšak pojem subjektivní barvy znamená, že jsou barvy vyvolány achromatickým podnětem, tedy tam kde bychom je vidět neměli. Tomuto pojmu se práce věnuje v dalších kapitolách. [2; 4; 5]

Odstín, jas a sytost barev pomáhají rozlišit dvě různé barvy. Převládající vlnová délka, kterou pozorovaný předmět odráží, určuje jeho barevný odstín. Ten může mít různý jas a sytost. Jas je spojený s intenzitou – barvy s nižším jasnem mohou přecházet až do černé, vysoce intenzivní barvy můžeme vnímat až jako bílé. Sytost je ovlivněna spektrální skladbou. Čím větší procento zaujímá jedna vlnová délka, tím je barva sytější. Méně syté barvy se blíží bílé. Lidské oko je schopno odlišit rozdíl mezi dvěma vlnovými délkami až do 1 nm, tím pádem rozeznává tisíce barev. [2; 4; 5]

Dvě na pohled identické barvy mohou mít různou skladbu spektra, což ale pohledem nelze rozlišit. Pokud je barva tvořena jen jednou vlnovou délkou, označuje se jako monochromatická. Stejná barva však může vzniknout smícháním dvou barev. Mísení subtraktivní znamená, že ze světla původně tvořeného více vlnovými délkami odebíráme určité vlnové délky pomocí např. filtru. Pokud odfiltrujeme všechny vlnové délky, dostaneme černou barvu. Aditivním mísením se spektrum naopak rozšiřuje. Pokud přidáme k modré (zástupce krátkých vlnových délek) žlutou (zástupce delších vlnových délek) vznikne bílá, jelikož bude obsahovat více složek spektra. Pro popis aditivního míchání se zavádí tzv. barevný trojúhelník (viz obr. 3 na následující straně). Existují totiž trojice základních barev, pomocí kterých lze vytvořit téměř jakoukoliv barvu spektra. Obvykle je to červená (R), zelená (G) a modrá (B). Tyto tři barvy tvoří vrcholy trojúhelníku, uprostřed se nachází bílá. Po obvodu trojúhelníku nalezneme syté spektrální

barvy a na spojnici modré (B) a červené (R) barvy purpuru. Každé dvě barvy, jejichž smícháním dostaneme bílou, se nazývají doplňkové barvy. Na barevném trojúhelníku je lze spojit přímkou procházející bílou barvou, např. zelená (G) a purpurová. [2; 5; 7]



Obr. 3 – Barevný trojúhelník

## 2.1. Teorie vnímání barev

Mechanismus barevného vidění není zcela objasněn. Nejznámější teorií je Helmholtzova trichromatická teorie, která je v souladu s poznatkem, že ze tří základních monochromatických barev lze vytvořit většinu vnímaných barev. Helmholtz předpokládal, že v sítnici musí existovat tři různé typy receptorů, které reagují na složky spektra s různou citlivostí. Jejich signál je přenášen do mozku, kde je zpracováván. Z pozdějších výzkumů bylo prokázáno, že receptory lidského oka reagují s maximální citlivostí na části spektra odpovídající modrofialové, zelené a žlutozelené barvě. Proto byly označeny jako S, M a L čípky (z angličtiny: short, medium, long wavelength). [5; 8]

Druhá teorie vysvětlující barevné vnímání vznikla na základě výzkumu Ewalda Heringa – teorie oponentního procesu. Tvrdí, že zrakový systém reaguje na různé vlnové délky protichůdně, což odpovídá mechanismům receptivních polí barevně oponentních buněk popsaných v předchozí kapitole. Předpokládá dva kanály, první zpracovává

červenou a zelenou, druhý modrou a žlutou. Z novodobých výzkumů vyplývá, že jsou platné obě teorie, avšak působí v různých částech zrakové dráhy. Ve vrstvě fotoreceptorů se uplatňuje Helmholtzova teorie. Receptivní pole gangliových buněk a neuronů v corpus geniculatum laterale pak umožňují oponentní proces. Do kanálu pro červenou a zelenou přichází opačný signál od M a L čípků. Kanál pro zpracování modré a žluté barvy přijímá aktivační signál z S čípků a inhibiční signál z M a L čípků (nebo naopak). Tyto dva typy se označují M/L a S/(M+L). [2; 5; 7]

Tanabe et al. [9] prováděli výzkum zrakových center zpracovávajících barvy pomocí magnetické rezonance. V průběhu vyšetření probandům současně prezentovali Benhamovu iluzi a reálnou barvu. Snažili se zjistit, zda jsou reálné i subjektivní barvy ve zrakovém systému vedeny stejnou dráhou a zpracovány podobným způsobem. Z jejich výzkumu je patrné, že oblasti týlního laloku, které slouží ke zpracování reálných barev, přijímají signál také při percepci subjektivních barev. Tyto oblasti zrakového kortexu mají při zpracování barev rozdílné role, ale pro vytvoření barevného vjemu pracují dohromady jako systém. [9]

## 2.2. Poruchy barvocitu

Schopnost správně vnímat barvy se označuje jako trichromazie. Porucha barvocitu (někdy označovaná jako barvoslepost) nastává, pokud člověk nerozezná některé barevné odstíny. Tedy pokud je pigment jednoho nebo několika typů čípků změněn nebo úplně chybí. Nejčastější poruchou je anomální trichromazie, dělíme ji na protanomálii, deuteranomálii a tritanomálii. U těchto poruch dochází ke změně ve spektrální citlivosti L, M nebo S čípku (v tomto pořadí) a člověk si nemusí být vůbec vědom, že se jedná o vadu. Při dichromazii je změněn nebo chybí jeden druh čípků. L čípek u protanopie, M čípek u deuteranopie a S čípek u tritanopie. Monochromazie je velmi vzácná vada, která se projevuje viděním v odstínu jedné barvy (čípkový monochromat) nebo v odstínech šedé – tyčinkový monochromat (achromatopsie). Achromatopsie je často spojena s nystagmem a sníženou zrakovou ostrostí. [5; 10]

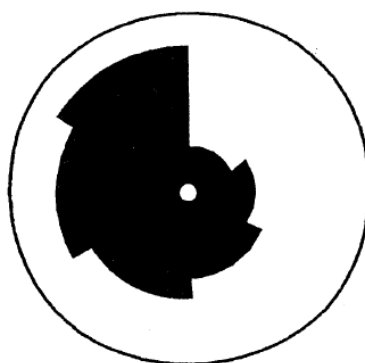
K diagnostice poruch barvocitu se používají různé testy. Např. pseudoizochromatické tabulky. Jedná se o obrázky složené z barevných koleček různého jasu

a dvou barevných odstínů [5]. Jeden odstín vytváří nápis (většinou číslo nebo písmeno) a druhý odstín vyplňuje pozadí. Záměrně se volí taková dvojice barev, aby nebyla pro jedince s danou poruchou barvocitu rozpoznatelná a nápis se tudíž stal nečitelným.

### 3. HISTORIE BENHAMOVA KLAMU

Francouzský mnich Benedict Prevost poprvé pozoroval subjektivní barvy v roce 1826. Nacházel se v tmavé místnosti, kde pohyboval bílou obdélníkovou lepenkou kolmo na paprsek světla, který pozoroval. Původně bílé světlo měnilo své barvy na fialovou, tmavě modrou, zelenožlutou a červenou. Prevostovi to připomínalo rozklad světla prizmatem, ale byl si vědom, že se jedná o fyziologický jev. I když v té době ještě nebyla známa teorie o třech zrakových receptorech, předpokládal, že na sítnici existuje jakási látka, která společně s nervy umožňuje vidění barev. Dále, že tato látka, respektive látky, působí různě rychle, a proto může přerušované bílé světlo složené z různých vlnových délek způsobit vjem subjektivních barev. [11]

Jev byl několikrát znovuobjeven, např. Gustavem T. Fechnerem v roce 1838. Používal napůl černý a napůl bílý disk rotující kolem své osy, který vytvářel vjem šedé barvy. Fechner předpokládal, že jas šedé barvy je ovlivněn poměrem mezi černou a bílou plochou. Když se snažil vytvořit vjem několika šedých koncentrických kruhů odstupňovaných od nejtmavšího po nejsvětlejší (použitím disku na obr. 4) zaznamenal vjem ne příliš sytých barev, které však viděli i další lidé. Při dalších experimentech zjistil, že na vnímané barvy má vliv rychlost a směr otáčení. Navrhl, že barvy vznikají kvůli různým rychlostem přechodu receptorů do klidového stavu. Toto tvrzení podpořil Helmholtz ve své teorii, že tři typy receptorů pro barvu se liší nejen v rychlostech přechodu zpět do klidového stavu, ale také v rychlosti jejich vybuzení. Odpověď receptorů přichází vždy v pořadí červená, zelená, modrá a klidový stav nastupuje v opačném pořadí. [11; 12]



Obr. 4 – Fechnerův disk [13]

### 3.1. Benhamův disk

Benhamova iluze nese jméno podle britského výrobce hraček Charlese E. Benhama, který v roce 1894 vyrobil tzv. káču, jejíž hlavní část tvořil plochý disk s černobílým vzorem (obr. 5). Po jeho roztočení viděli lidé na disku různé barvy. [14]



Obr. 5 – Benhamův disk [13]

Benham používal ve svých pokusech disk o průměru 10,8 cm upevněný na hřídeli, jehož polovina byla černá a polovina bílá. Na bílé ploše byly 4 skupiny po třech prstencích černé barvy v rozsahu  $45^\circ$  a tloušťce asi 1 mm. Jeho předloha se stala později téměř standardem. Při roztočení takového disku se každá skupina černých linek jevila v jiné barvě, přičemž pokud se kotouč otáčel v opačném směru, tak se pořadí subjektivních barev prohodilo. Benham uvedl, že barvy lze pozorovat i přes úzkou clonu nebo zvětšující sklo. Dále tvrdil, že po osvětlení disku jasným sodíkovým plamenem, který považoval za monochromatické světlo, lze vidět modrou a červenou barvu. Poslední tvrzení popřel prof. Liveing ve svém příspěvku do časopisu Nature [15], který po osvětlení žlutým sodíkovým světlem zaznamenal pouze tmavě hnědé, světle hnědé a šedé pruhy. Jako první usoudil, že se jedná o subjektivní jev, jelikož u různých lidí byla potřeba k vyvolání vjemu různá rychlost otáčení. [16; 17]

## 4. VLIV URČITÝCH PARAMETRŮ NA VJEM SUBJEKTIVNÍCH BAREV

V této kapitole jsou shrnuty dosavadní znalosti o Benhamově iluzi z vybraných studií. Nejlépe je iluze pozorovatelná na plochem kotouči, který se točí kolem vlastní osy. Je rozdělený na dvě poloviny, kdy jedna je černá a druhá bílá. Na bílé ploše se nachází několik černých prstenců v různých polohách a různé vzdálenosti od středu. Když se kotouč točí, prstence vytváří vjem soustředných kružnic, které se mohou zdát různě barevné. Tyto zdánlivé barvy se pak označují např. jako subjektivní barvy nebo vzorem vyvolané blikající barvy (pattern induced flicker colours).

### 4.1. Rychlost a směr otáčení disku

Rotace Benhamova disku o frekvenci 3 Hz a rychlejší vyvolává vjem subjektivních barev. Některé studie uvádí, že nejvíce syté barvy vznikají při 5 až 10 Hz, či konkrétněji při 7 otáčkách za vteřinu [18]. Tanabe [9] tvrdí, že slabé barvy viděli někteří figuranti už při 1,5 Hz, ale neuvádí horní hranici, kdy jsou barvy ještě zřetelné. Vysoká rychlost způsobuje blednutí barev až do šeda a nízká tmavnutí. Postupně klesá jejich intenzita, je více patrné „blikání“ černé a bílé. Nakonec se barvy změny v černou. Přesné hranice barevných změn však nejsou známy. Rozdíl ve vnímaných barvách působí také směr otáčení. Když se Benhamův kotouč (obr. 5 na předchozí straně) otáčí ve směru hodinových ručiček, jsou barvy oblouků od vnitřního ke vnějšímu: načervenalý, nazelenalý, světle modrý a tmavě fialový. Jakmile se změny směr otáčení, prohodí se také pořadí barev u jednotlivých oblouků. Tudíž pokud se disk otáčí proti směru hodinových ručiček, budou barvy (od vnitřní k vnější): tm. fialová, světle modrá, nazelenalá, načervenalá. [13; 19]

Při vysokých rychlostech rotace disku byl na jeho povrchu pozorován zdánlivý vzor složený z hexagonálních tvarů. Popisuje ho řada studií, může být v podobě mozaiky složené ze šestihranných vícebarevných buněk [11]. Nebo nazelenalých hexagonálních skvrn, které obsahují v centru světlou tečku obklopenou červeným pohybujícím

se vláknem [20]. Pravděpodobně se jedná o formu halucinace vyvolanou blikajícím světlem (tedy černým a bílým pozadím). Podle výzkumu [21] se objevuje v podobě pláští vyplňujících celé zorné pole, při frekvenci v rozmezí zhruba 5–25 Hz.

## 4.2. Vliv osvětlení

Benhamův kotouč a jeho modifikace byly pozorovány pod různými typy osvětlení: neutrálním (tvořeným celou škálou spektra), monochromatickým za použití různých vlnových délek nebo po adaptaci na jiné jasné světlo. Zkoumal se vliv spektrálního složení či intenzity osvětlení. Bagley [19] z výzkumu vyvozuje, že při jasném denním osvětlení se subjektivní barvy jeví více domodra, je zvýrazněna oblast krátkých vlnových délek. Naopak snížené osvětlení způsobuje vjem spíše červenějších či zelenějších proužků. Je známo, že odstíny subjektivních barev prochází při postupném zvyšování intenzity osvětlení určitou proměnou. Tuto proměnu lze zanést do barevného diagramu, kde vytváří nepravidelně kruhovitou křivku a ukazuje se, že odstíny, které jsou zaznamenány při nízké hodnotě osvětlení, přibližně odpovídají odstínům pozorovaných při velmi vysoké intenzitě osvětlení [13].

Abney [22] osvětloval Benhamův kotouč (obr. 5, str. 16) různě barevným a téměř monochromatickým světlem a popsal změny viděných subjektivních barev. Jeho pozorování jsou shrnuta v následující tabulce pro rotaci disku ve směru hodinových ručiček.

Tab. 1 – Benhamův disk pod různě barevným osvětlením a rotaci ve směru hodinových ručiček (podle [22]).

|             | BARVA<br>OSVĚTLENÍ  | BÍLÁ                  | ČERVENÁ        | ZELENÁ             | MODRÁ             | FIALOVÁ        |
|-------------|---------------------|-----------------------|----------------|--------------------|-------------------|----------------|
| BARVA PRUHU | <b>vnitřní pruh</b> | karmínová             | červená        | modrozelená        | zelená            | světle fialová |
|             | <b>druhý</b>        | olivová               | světle červená | světle modrozelená | světle zelená     | světle fialová |
|             | <b>třetí</b>        | šedá (světle fialová) | světle olivová | světle modrozelená | světle zelená     | světle fialová |
|             | <b>vnější pruh</b>  | tmavě fialová         | tmavě olivová  | načervenalá černá  | načervenalá černá | tmavě fialová  |

Podobné výsledky vykazuje experiment [23], ve kterém autoři navodili monochromatickým osvětlením o různých vlnových délkách stejné změny subjektivních barev jako při změnách směru rotace. Postupně měnili vlnovou délku osvětlení z původních 534 nm na 583 nm, což se projevilo prohozením pořadí subjektivních barev na opačné, podobně jako když Abney osvětloval disk červeným a modrým světlem. [23]

Po fixaci velmi jasného bílého adaptačního pole ( $50\,000\text{ cd/m}^2$ ) zaznamenali Karvellas et al. [24] změny ve vnímaných barvách na Benhamově disku. Disk se otáčel proti směru hodinových ručiček. Před adaptací na světlo se zdály prstence (od vnitřního vně): tmavě modrý, tmavě zelený, žlutozelený a červený. Po adaptaci (trvající asi jednu minutu) se všechny pruhy zdály nejprve bezbarvé, později byly bezbarvé jen vnitřní dva, další červený a vnější zelený. Několik minut se ještě měnil vjem vnějších dvou pruhů na původní sled, vnitřní dva pruhy dostali barevný nádech až po 2,5 minutách. Vysvětlení se nepodařilo nalézt. Kdyby bylo pravdivé tvrzení, které zastával Helmholtz a další, vysvětlující vjem subjektivních barev pouze různě rychlou reakcí čípků, pravděpodobně by byly změny v barvách pravidelné. Pořadí barev by bylo stejné, avšak vztahovaly by se k jiným prstencům. [24]

Jak bylo uvedeno v kap. 2, člověk není schopen pouhým okem poznat spektrální složení barev. Proto mohou být dvě napohled stejná světla složena z různých vlnových délek. Takováto světla se nazývají metamerická a i když se původně myslelo, že budou způsobovat vjem různých subjektivních barev, byl prokázán opak. Subjektivní barvy se neliší, pokud na každou polovinu Benhamova disku svítí stejně barevná a jasná světla, avšak obsahující různé složky spektra. Celkově totiž vytvářejí stejné množství excitace ve třech typech čípků a tím pádem i v dalších buňkách zrakového systému. [13; 23]

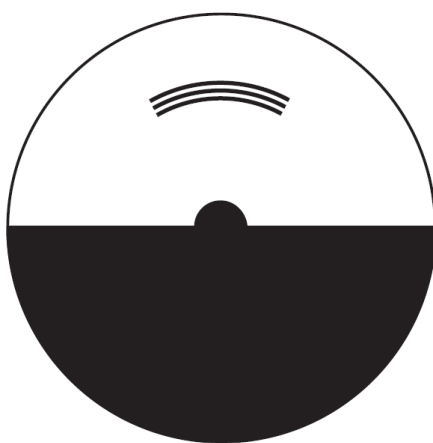
### **4.3. Tloušťka, délka a rozmístění čar**

Názory ohledně vlivu tloušťky čar na vjem subjektivních barev nejsou zcela jednotné. Finnegan a Moore [25] vyměnili na Benhamově disku čtyři trojice čar za čtyři široké pruhy. Jedním z jejich závěrů bylo, že se subjektivní barvy objevují jen při okrajích čar, pokud jsou příliš široké nebo jsou pozorovány z příliš těsné blízkosti (takže se zvětší sítnicový obraz). Podobného závěru došel také Bidwell [16], který udává,

že pokud je tloušťka čáry mnohem větší než 1 mm a je pozorována pod zorným úhlem větším než asi  $12^\circ$ , tak se barvy objevují jen na hranici pruhů a jejich vnitřní část je černá nebo šedá. Platí to zejména pro červenou barvu. Z těchto pozorování opět vyplývá, že různě rychlé odpovědi třech druhů čípků samy o sobě nejsou dostatečným vysvětlením daného jevu. [11]

Ve výzkumu prováděném Festingerem et al. [18] byly široké prstence provedeny v šedé barvě a iluze zůstala zachována. Figuranti nezaznamenali významné změny ve vnímané barvě u tenkých a širokých pruhů, a to ani při jejich okrajích. Podle Bagley [19] se projevuje vliv tloušťky jen u některých prstenců. Většina figurantů viděla barevné či pozměněné okraje pouze u proužků načervenalých nebo nafialovělých, zatímco nazelenalé pruhy viděli téměř všichni barevné v celé tloušťce. [19]

Když se bílá polovina Benhamova disku pomyslně rozdělí na tři sektory, kdy jeden vyplňují pruhy a dva pouze bílá plocha, ovlivňuje jejich vzájemné pořadí vnímanou subjektivní barvu. Například zelenou barvu lze vidět, pokud na černou polovinu disku na obrázku 6 navazuje nejdříve bílá plocha, pak následují pruhy a nakonec opět bílá plocha. Podle Piérona [11] je důležitý také úhel, který svírá okraj černého pozadí se začátkem černého prstence (tedy rozsah prvního bílého sektoru na obr. 6). Fry [11] tvrdí, že spíše celkové množství bílé plochy před a za prstencem ovlivňuje vnímaný odstín. Pořadí jednotlivých třech sektorů vůči černé ploše disku a odstín, který vyvolávají, shrnuje tabulka 2. [19; 25]



Obr. 6 – Disk pro vyvolání vjemu zelené barvy

Tab. 2 – Vzájemné pořadí třech sektorů na disku a barevný vjem, který vyvolávají.

| BARVA            | ČERVENÁ | ZELENÁ | MODRÁ |
|------------------|---------|--------|-------|
| POŘADÍ<br>SEKTRŮ | pruh    | bílá   | bílá  |
|                  | bílá    | pruh   | bílá  |
|                  | bílá    | bílá   | pruh  |

Prodloužení čar způsobuje, že se barvy zdají být méně intenzivní a tmavou [19]. Piéron uvádí, že optimální rozsah černých prstenců je asi  $45^\circ$ , což přibližně odpovídá délce prstenců na Benhamově disku (obr. 5, str. 16). Na klasickém Benhamově disku je rozsah bílé plochy  $180^\circ$ , pokud se však rozšíří na úkor černého pozadí, může prstenec zaujímat rozsah  $180^\circ$  a více. Subjektivní barvy lze vidět při délce čar od  $45^\circ$  do  $180^\circ$ , u kratších délek hůře, při větších délkách mizí. [11]

#### 4.4. Barva a uspořádání pozadí

Za pozadí Benhamova disku se považuje kombinace černého a bílého polokruhu, která navozuje vjem blikání. Jeho vliv byl zkoumán např. z hlediska, zda je důležité pouze rozmístění jednotlivých prstenců v rámci bílé plochy, či jestli subjektivní barvy nesouvisí se skutečným trváním stimulace. Bagley [19] ve svém výzkumu zmenšovala nebo rozšiřovala černou plochu kotouče a zbývající bílou část rozdělila na 4 sektory jako je to u klasického Benhamova disku. Jednotlivé prstence pak měly buď větší, nebo menší rozpětí. Z jejích výsledků vyplývá, že pokud je černá plocha rozšířena tak, že tvoří více jak polovinu kotouče, mění se vjem subjektivních barev směrem k delším vlnovým délkám. Když je černá plocha zmenšena, dochází ke zvýraznění naopak krátkých vlnových délek. Výsledky Piéronových experimentů jsou shodné pouze částečně. Říká, že zmenšení černé plochy pozadí vede ke změně barvy u vnitřních pruhů z červené na zelenou, ale dochází také k zeslabení modrého efektu u vnějších pruhů. Tento rozpor pravděpodobně vznikl kvůli rozdílnému rozmístění prstenců Piéronem v rámci bílé plochy. V jeho případě totiž vznikl mezi prstenci a černou plochou disku bílý prostor. Dále lze ovlivnit subjektivní barvy vložení úzké černé výseče do bílého pozadí. Pruhy, které se nachází před touto výsečí, zmodrají a pruhy za ní zčervenají. Opačně přidání bílé

výseče do černé části pozadí má spíše vliv jako celkové zmenšení černé plochy popsané Piéronem. [11; 19]

Když se nahradí bílá barva na pozadí Benhamova disku jinou barvou, dojde ke změně vnímaných subjektivních barev. Bagley předpokládá, že se v takovém případě zapojuje jev simultánního kontrastu. Část sítnice, kde se vytváří sítnicový obraz, se adaptuje na danou barvu pozadí. Zároveň se zvyšuje relativní citlivost pro doplňkovou barvu, a to i v sousedních částech sítnice. Použitím červeno-černého pozadí (místo bílo-černého) se původně (zdánlivě) červené linky zdají být zelené. Když použijeme zeleno-černé pozadí, tak budou stejné linky vypadat stále červeně. Použití barvy z oblastí spektra, které sousedí se subjektivní barvou, dochází k mísení barev a výsledná subjektivní barva je většinou světlejší nebo tmavší. Inverzí barev u Benhamova kotouče (bílé prstence na černém pozadí) přestávají být barvy vidět na prstencích a objevují se na jiných částech kotouče, kde konkrétně není uvedeno [11]. Při výzkumu prováděném v rámci této práce se toto tvrzení nepotvrdilo, barvy byly méně zřetelné, ale byly viděny na prstencích jako u klasického disku. [19; 26]

#### **4.5. Subjektivní barvy při poruše barvocitu**

Stále se přesně neví, jak zrakový systém zpracovává barevnou informaci ani jak vzniká Benhamova iluze. Jedna z teorií tvrdí, že informace o barvě by mohla být kódována jako určitý sled nervových aktivit proměnlivých v čase [27]. Nervová aktivita vznikající při pohledu na rotující Benhamův disk může korespondovat s těmito kódy a vyvolávat tak vjem barev. Pokud by byla barvoslepota spojena pouze s problémem na úrovni fotoreceptorů, mohl by vzor Benhamova disku vyvolat kopie nervových kódů pro barvy, které člověk s poruchou barvocitu nikdy předtím neviděl. To se však nepotvrdilo, tudíž poruchy barvocitu mohou být spojeny nejen s anomálním či chybějícím fotopigmentem, ale i se změnami v centrálním nervovém systému. Pravděpodobně kvůli nedostatku určitých barevných stimulů ztratil nervový systém při vývoji schopnost vytvářet příslušné nervové kódy. U dichromata jsou tedy všechny barevné podněty kódovány prostřednictvím dvou typů čípků. Pokud tyto předpoklady platí, dá se očekávat, že dichromat uvidí iluzorní barvy stejně jako normální barvy, i když jinak než trichromat. [27]

Dichromaté nejsou schopni přiřadit k vnímané subjektivní barvě odpovídající barevný žeton z atlasu kalibrovaných barev, avšak k jednomu barevnému žetonu druhý shodně barevný nalézt umí. Z toho vyplývá hypotéza, že subjektivní barvy nejsou shodné s barvami, které může člověk s poruchou barvocitu vidět při stimulaci klasickým vnějším podnětem. Von Campenhausen a Schramme [13] předpokládá, že schopnost mozku vytvářet barevný vjem není omezena tolik jako na úrovni fotoreceptorů, a že množství barevných kódů není u dichromata redukováno tak, jak se původně myslelo. [13]

## 5. TEORIE A MODEL Y

Zatím neexistuje žádné obecně uznávané vysvětlení Benhamova klamu. Starší teorie zahrnující adaptaci fotoreceptorů, fyzikální charakter světla nebo barevné aberace zrakového systému byly vyloučeny po přezkoumání daného jevu. Dalším takovým příkladem jsou následné obrazy. Jedná se o jev, kdy dochází k adaptaci sítnice na podnět a vzniká jeho tzv. následný obraz většinou v komplementárních barvách. Tento vjem pak určitou dobu přetrvává, i když zanikne původní podnět (člověk se podívá jinam). Jeho vliv na vznik subjektivních barev ale vyloučili např. Pauli a Wenzl. [11; 28]

Nejznámější teorií vysvětlující subjektivní barvy je předpoklad, že různé vlnové délky světla jsou zpracovávány různou rychlostí, jelikož reakce S čípků je pomalejší než relativní rychlost reakce M a L čípků. Přestože bylo toto vysvětlení několikrát zpochybněno (zmíněno v podkapitole 4.2 a 4.3), existují studie, které ho podporují. Piéron experimentálně zjišťoval dobu latence mezi třemi systémy umožňujícími barevné vidění. Posvítil barevným světlem (červeným, zeleným a modrým) a měřil dobu, která je potřeba, než si pozorovatel uvědomí danou barvu. Většina výsledků potvrzuje předpoklad, že nejrychleji reaguje systém pro červenou a nejpomaleji pro modrou barvu. Rozdíly mezi rychlostmi odezvy těchto jednotlivých systémů jsou však malé a nejsou dostatečné pro vysvětlení Benhamovy iluze. Schramme [29] ve svém článku uvažuje, že vzor Benhamova disku může měnit výstupní signál barevně oponentní gangliové buňky, a tím vyvolat barevný vjem. Z jeho výzkumu vyplývá, že změny subjektivních barev jsou vyvolány změnou v aktivitě barevně oponentních neuronů (viz podkap. 2.1), které reagují na modré a žluté světlo. Jednotlivé čípky pravděpodobně nepřispívají stejnou měrou do kanálu  $S/(M+L)$ . [18; 28]

### 5.1. Kódování barevného signálu a stacionární vzor

Další teorie navrhuje, že impulzy, které prochází vlákny optického nervu a nesou informaci o barvě, mohou být kódovány, tzn. různými způsoby uspořádány v čase tak, aby reprezentovaly určité barvy. Vzor na Benhamově disku může způsobit simulaci

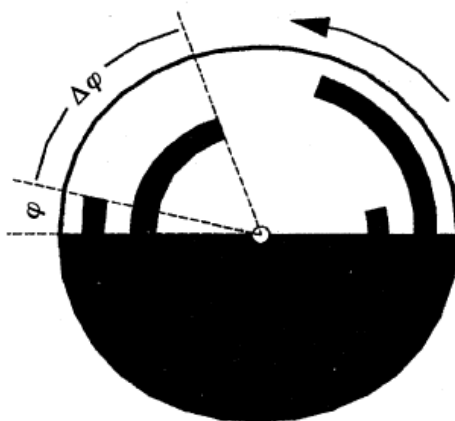
těchto kódů. Při rotaci disku se pravděpodobně vytváří sled nervových aktivit, které napodobují pravé kódování barevného signálu. Podle některých vědců by pro vytvoření kopií pravých kódů barev nemusel být potřeba ani rotující černo-bílý disk a subjektivní barvy by tím pádem měly jít vytvořit i pomocí stabilizovaného vzoru. Tento názor podporuje i znalost, že mimovolní oční pohyby (jako je drift) nehrají velkou roli při generaci subjektivních barev. [11; 18]

Festinger et al. [18] navrhuje možnost, že tenké linky na Benhamově kotouči vytváří středně intenzivní stimulaci sítnice (relativně vůči stimulaci, kterou vytváří černá a bílá barva vzoru), jelikož při rotaci dochází k určitému rozmazání. Vzor Benhamova disku tedy na sítnici vytváří sérii stimulací lišících se v intenzitě (jedná se o kombinaci maximální, střední a minimální stimulace), podle které se excitují neurony sítnice. Vhodná kombinace těchto tří stimulací by se dala považovat za kopii nervového kódu pro určitou barvu. Pro generaci subjektivní barvy by tudíž nebyl potřeba pohybující se vzor, stačila by kombinace záblesků o různém jasu. I když některé studie považují generaci subjektivních barev na základě modulace jasu za spornou. Festinger svoje tvrzení ověřil dvěma způsoby. Tenké černé linky nahradil širokými šedými pruhy, přičemž iluze barev zůstala zachována, jelikož intenzita stimulace sítnice zůstala nezměněna. Dále černo-bílý vzor Benhamova kotouče nahradil nehybným světelným zdrojem, který opět vytvářel požadovaný sled stimulací o různé intenzitě nahrazující barevný kód. Iluze zůstala zachována za předpokladu, že byl světlený záblesk doplněn o blikající pozadí. [18; 30]

## **5.2. Laterální interakce na sítnici**

Vliv na subjektivní barvy přisuzoval již Bidwell [16] interakcím probíhajícím mezi sousedními oblastmi sítnice. Von Campenhausen a Schramme [13] se ve svém výzkumu zaměřili zejména na laterální inhibici (více v kap. 1). Důležitý je podle nich vztah mezi pozadím a prstenci, protože pokud se blikání černo-bílého pozadí odstraní, subjektivní barvy zmizí. Používali disk na obrázku 7 obsahující dva oblouky. Podle nich tyto oblouky vytváří na sítnici dva stimuly, které mají vzhledem ke stimulu vyvolanému pozadím různou fázi. Navíc ovlivňují sousední oblasti sítnice. Signál vedený z oblasti sítnice excitované vlivem prstenců a vlivem pozadí se musí někde setkávat. Konkrétní

zodpovědné buňky nejsou s jistotou známe, nejčastěji se místo propojení přisuzuje amakrinním, horizontálním nebo gangliovým buňkám sítnice. Na jejich výstupním signálu se pravděpodobně projeví fázové rozdíly, které jsou mezi přicházejícími dvěma signály, což způsobuje vznik subjektivní barvy. Některé novější výzkumy jsou v souladu s touto hypotézou, ale ukazuje se více pravděpodobné, že původ subjektivních barev není omezen jen na sítnici. Zahrnuje i zraková centra v mozkové kůře. [9; 13]



Obr. 7 – Upravený Benhamův disk [13]

### 5.3. Matematické modely

Pro vysvětlení generace subjektivních barev Benhamovým diskem bylo navrženo několik matematických modelů. Většina zahrnuje fyziologické parametry gangliových buněk a současně aspekty jevu související s prostorovým uspořádáním i se změnami v čase. Grunfeld a Spitzer [30] vytvořili model vztahující se ke zjednodušenému Benhamovu disku (obr. 8), který je založen na reakcích receptivních polí gangliových buněk typu L/M a S/(M+L). Model bere v úvahu „historii stimulace“, tzn., když se kotouč točí, je důležité, v jaké poloze jsou na bílé ploše umístěny černé oblouky. Např. pokud začíná oblouk společně se začátkem bílého pozadí, vytváří většinou vjem červené barvy. Dále zahrnuje odpověď buňky na inhibiční stimul (rebound response), podle jiných zdrojů ale tato odezva nebyla u gangliových buněk primátů nalezena [31]. Gangliové buňky typu L/M reagují na dlouhou vlnovou délku aktivací a na světlo střední vlnové délky inhibicí nebo opačně. Z buněk typu S/(M+L) je brán v úvahu typ, u kterého

krátká vlnová délka inhibuje buňku a kombinace dlouhé a střední vlnové délky působí vybuzení. Pomocí modelu lze simulovat vjem červené, zelené a modré barvy. Autoři z výsledků usuzují, že vnímaná barva závisí na tom, jak velký je bílý sektor předcházející oblouku. [30]



Obr. 8 – Zjednodušený Benhamův disk

Matematický model Kenyona et al. [31] je založen na barevně oponentním neuronu zrakové kůry. Model splňuje předpoklady z některých dřívějších studií, např., že u příliš širokých pruhů jsou subjektivní barvy vidět pouze na jejich okrajích. Vychází z tvrzení, že Benhamova iluze vyžaduje aktivaci buď L nebo M čípků (ne S čípků). Signál z S čípků má pouze malý efekt. Model stojí také na předpokladu, že barevně oponentní buňky ve zrakové kůře přijímají signály z parvocelulární dráhy, která je spojuje s receptivními poli L a M čípků. Receptivní pole kortikálního neuronu je mnohem větší než receptivní pole buněk sítnice či corpus geniculatum laterale, proto dochází k jejich překrytí. Centrum receptivního pole neuronu zrakové kůry pak sbírá signál z několika receptivních polí patřících k buňkám z nižších vrstev zrakové dráhy. A to jak z jejich center, tak z periferií. Parvocelulární dráha slouží k přenosu informací o barvě i kontrastu dvou různých jasů. Autoři v závěru usuzují, že kombinace těchto dvou signálů může být pro přenos informace ve zrakovém systému účinná, ale může také činit zrakový systém náchylný k falešné aktivaci při stimulaci vhodným černo-bílým podnětem jako je Benhamův disk. [31; 32]

## 6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 6.1. Úvod

V rámci experimentální části práce byly zkoumány vlivy určitých parametrů při pozorování rotujícího černo-bílého kotouče na vjem subjektivních barev. Jak je uvedeno v kapitole 4, pořadí subjektivních barev, jak jsou viděny na kotouči, se může prohodit, pokud se změní směr rotace nebo při použití osvětlení různých vlnových délek. Proto byl v experimentu měněn směr rotace disku a bylo použito osvětlení různých barev, tedy různého spektrálního složení. Dále se zkoumal vliv intenzity osvětlení. Intenzivnější světlo by mělo způsobit přechod subjektivních barev ke kratším vlnovým délkám, méně intenzivní k delším. Je také známo, že poloha prstenců na bílé ploše disku či velikost černé plochy mohou změnit barvu pozorovaného prstence např. z červené na zelenou. Tudíž byly použity kotouče, které se od sebe lišily polohou prstenců a velikostí černé plochy. Délka prstenců podle Bagley [19] ovlivňuje intenzitu vnímané barvy, proto byly pozorovány kotouče s prstenci o různých délkách. Jeden z hlavních experimentů ověřoval, zda se při zvětšující tloušťce prstenců omezuje vjem iluzorní barvy pouze na okraj prstence. U zvoleného kotouče se zaznamenávala rychlost otáčení, při které se barvy právě ztratí, tedy změni v šedou či černou. A to při zpomalování i zrychlování v obou směrech otáčení kotouče. V doplňujících experimentech bylo použito kotouče s barevnými prstenci, kdy se zkoumalo, zda tato barva ovlivní danou subjektivní barvu. Dále stínítko omezující pozorovanou část kotouče, jelikož v literatuře se uvádí, že při omezeném zorném poli iluze mizí [13]. Vybrané kotouče byly prezentovány osobě s poruchou barvocitu.

### 6.2. Metodika

Výzkumu se zúčastnilo celkem 24 figurantů starších 18 let, bez očních onemocnění, z řad mužů i žen. V rámci hlavních experimentů to bylo 21 probandů. Doplňujících experimentů se zúčastnilo celkem 11 probandů, z nichž osm absolvovalo i hlavní

výzkum. Účastníci s refrakční vadou měli nasazenou vlastní korekci, se kterou již přišli, případně si nasadili korekci na čtení. Všichni probandi byli před samotným experimentem seznámeni s metodikou a požadavky výzkumu. Všem byl vyšetřen barvocit pomocí pseudoizochromatických tabulek. Také podepsali informovaný souhlas a byli upozorněni, že pokud trpí epilepsií nebo mají podezření na rozvoj tohoto onemocnění, neměli by se výzkumu účastnit. Blikání černo-bílého vzoru by mohlo jejich stav zhoršit.

Realizace výzkumu probíhala na katedře optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, vyšetřovací stanoviště viz obrázek 9. Bylo použito zařízení sestavené pro účely tohoto výzkumu tvořené plastovým diskem o průměru 6 cm, na který se pokládaly kotouče, a elektronicky řízeným krokovým motorem. Roztočení disku (kolem své osy) umožňoval řemenový převod s poměrem 1 : 12,93. Rychlost se zadávala pomocí jednoduchého programu na osobním počítači, který s elektronikou motoru komunikoval prostřednictvím virtuálního sériového portu přes sběrnici USB. Ve všech případech odpovídala zadaná rychlost skutečné rychlosti otáčení s relativní přesností lepší než 1 %. To bylo zjištěno pomocí stroboskopických měření. Hlavní příčinou uvedené chyby jsou nedokonalosti řemenového převodu. Plastový disk byl umístěn na rameni stojanu, který se dal polohovat tak, aby na plochu kotouče dopadalo dostatečné množství světla a zároveň se dal pozorovat figurantem sedícím vedle stolu. Plastový kotouč šel také nahradit plastovým válečkem a pomocí polohovatelného ramene natočit tak, aby se osa válečku nacházela vodorovně.

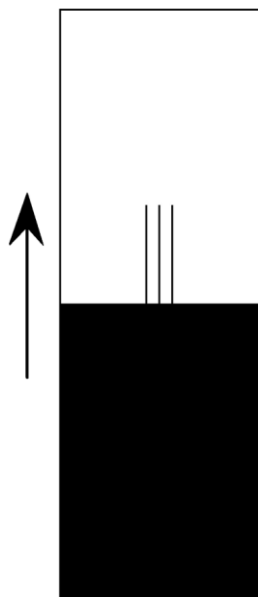


Obr. 9 – Vyšetřovací stanoviště

Výzkum probíhal v laboratoři se zatemněnými okny pro zachování konstantního a regulovatelného osvětlení. Všichni probandi sledovali rotující kotouč ze vzdálenosti 25–30 cm zhruba pod stejným úhlem 40–70 stupňů (směr pohledu vůči ose disku). Vzdálenost ani úhel pozorování nelze přesně stanovit a může se lišit u každého jednotlivce, jelikož při pozorování nebyla fixována hlava.

### **6.2.1. Pilotní experimenty**

Prvotní myšlenkou bylo použít místo kotoučků válečky, podobně jako Nishiyama ve svém článku [33]. Válečky mohou být složeny také ze sekvencí černá, bílá, pruhy jako je to u kotoučů. Na obr. 10 je zobrazena plocha válečku, který při otáčení ve směru šipky vyvolává střídání bílé plochy, pruhů a černé plochy. Podobně je tomu u vnějšího pruhu na Benhamově disku (obr. 5, str. 16), když se otáčí ve směru hodinových ručiček. Tento sled by měl vyvolávat vjem modré barvy [18]. Válečky by tudíž mohly být náhradkou kotoučků. Navíc stejné úhlové velikosti oblouků na disku neodpovídají stejným délkám, pokud jsou oblouky v jiné vzdálenosti od středu disku. Tento problém u válečků odpadá. Od záměru použít pouze válečky se však upustilo po několika pokusech. Hlavní příčinou byly nadměrné odlesky od povrchu válečků. Otáčející se papír osvětlený bílou LED žárovkou byl nejvíce osvětlen v horní části, zatímco dolní část válečku byla zastíněná jeho vlastní tloušťkou. Rozsvícení zářivek v místnosti ani clona z matného černého papíru neměly pozitivní efekt. Pozorování subjektivních barev bylo problematické. Na pružích se například objevovalo více subjektivních barev, i když tam měla být jen jedna. Na vedoucím okraji linek jiná barva než na opačném konci. Když se tloušťka pruhů zvětšila, neobjevila se iluzorní barva na pružích, ale v podobě haló efektu na hranici pruhů. Barvy byly celkově světlé.



Obr. 10 – Předloha pro váleček

Po vytvoření sady kotoučů o průměru 5,5–6,0 cm a o dané struktuře podle toho, co bylo předmětem zkoumání, byly tyto disky prezentovány dvěma figurantům. Na základě tohoto zkušebního testování byly upraveny konkrétní detaily, aby experimenty zahrnovaly co nejmenší počet kotoučů, avšak jednotlivé kroky byly dostatečně jemné.

### 6.3. Popis a výsledky experimentů

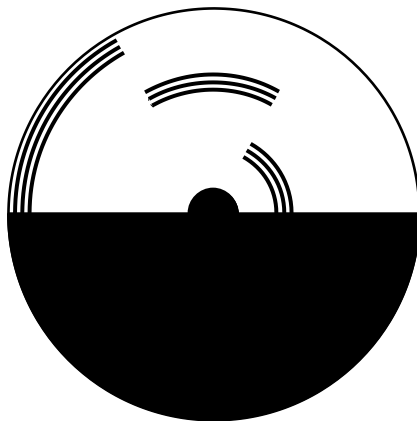
Experimentů je několik hlavních a doplňujících. Doplňené experimenty vznikly až na základě zběžného prozkoumání výsledků hlavních experimentů a součástí bylo také pozorování vybraného kotouče střídavě jedním okem nebo zastíněný clonkou. Všechny experimenty kromě prvního probíhaly při osvětlení kotouče přibližně 2700 lx. Místnost byla osvětlena zářivkou a kotouč navíc lampou s halogenovou žárovkou o 50 W pod úhlem 50–60 stupňů k ose disku. Vzdálenost mezi lampou a kotoučem činila zhruba 20 cm. Rychlost rotace disku byla upravena v rozmezí 8–9 ot/s podle toho, kdy viděli figuranti barvy lépe. Dále mají všechny experimenty společné, že u každého kotouče byly zaznamenány subjektivní barvy v kladném směru (podle hodinových ručiček) i v záporném směru (proti směru hodinových ručiček). Figuranti byli tázáni, zda vidí

barvy, a na kterých prouzcích. Barvy měli vyjádřit vlastními slovy. Pokud si nebyli jistí, měli jako pomůcku k dispozici tabulku kalibrovaných barev Munsellova barevného systému umístěnou vedle zařízení s kotoučem (vytištěna na kalibrované tiskárně ve specializované prodejně Xerox). Subjektivní barvy byly probandy nejčastěji označovány základními jmény (žlutá, zelená, apod.). Byly však zaznamenávány i netypické barvy jako např. žlutozelená nebo červenooranžová. Jména barev, která pouze upřesňovala odstín jako khaki, olivová nebo šedozelená, byla zaznamenána, ale při vyhodnocování výsledků byl brán v úvahu jejich ekvivalent (v tomto příkladu zelená). Označení tmavá a světlá barva byly brány na zřetel u experimentů, které hodnotily změny jasu subjektivních barev. Pokud byla zkoumána pouze změna odstínu, bylo toto upřesnění ignorováno a např. hnědá byla považována za tmavší (méně jasnou) oranžovou.

### **6.3.1. Experiment 1**

Podmínky prvního experimentu se liší od ostatních v osvětlení a rychlosti rotace. Byl použit kotouč 1 na obrázku 11, jehož prstence mají tloušťku přibližně 0,5 mm a zaujímají rozsah 60°. Sledovaly se změny subjektivních barev za použití různého osvětlení. Nejprve byla měněna intenzita osvětlení při konstantní rychlosti otáčení (8 až 9 ot/s) ve směru hodinových ručiček. Jednotlivá osvětlení byla měřena luxmetrem umístěným vedle kotouče, ve stejné rovině. Tudíž naměřená hodnota přibližně odpovídá skutečně dopadajícímu světlu. Postupovalo se ve třech krocích. V prvním kroku byl kotouč osvětlen 2700 lx. Jedná se o stejné osvětlení jako u zbývajících experimentů (tvořené zářivkou a halogenovou žárovkou) popsané výše. Poté byla lampa zhasnuta, osvětlení se tak snížilo na 40–80 lx (pouze zářivka místnosti). V posledním kroku bylo osvětlení zesíleno asi na 4500 lx, kdy byl kotouček osvětlen zářivkou a dvěma lampami. Druhá lampa obsahovala bílou LED žárovku (výrobce Technaxx) o 10 W ve vzdálenosti asi 20 cm od kotouče a svítila pod úhlem 50–60 stupňů k ose disku. Pokaždé byly zaznamenány viděné subjektivní barvy. Předmětem zkoumání byla změna těchto barev vždy u každého prstence zvlášť při snížení a zvýšení osvětlení. Např. subjektivní barva na vnitřním prstenci kotouče 1 (obr. 11) byla jedním figurantem označena jako žlutá při osvětlení 2700 lx, při osvětlení 40–80 lx jako oranžová. V tomto případě se jednalo o změnu odstínu, v jiných případech šlo o změnu jasu (barva byla tmavší či světlejší,

ale odstín stejný). Odstín či jas subjektivní barvy byl porovnáván mezi barvami zaznamenanými při osvětlení 2700 lx a 40–80 lx, potom při 2700 lx a 4500 lx.

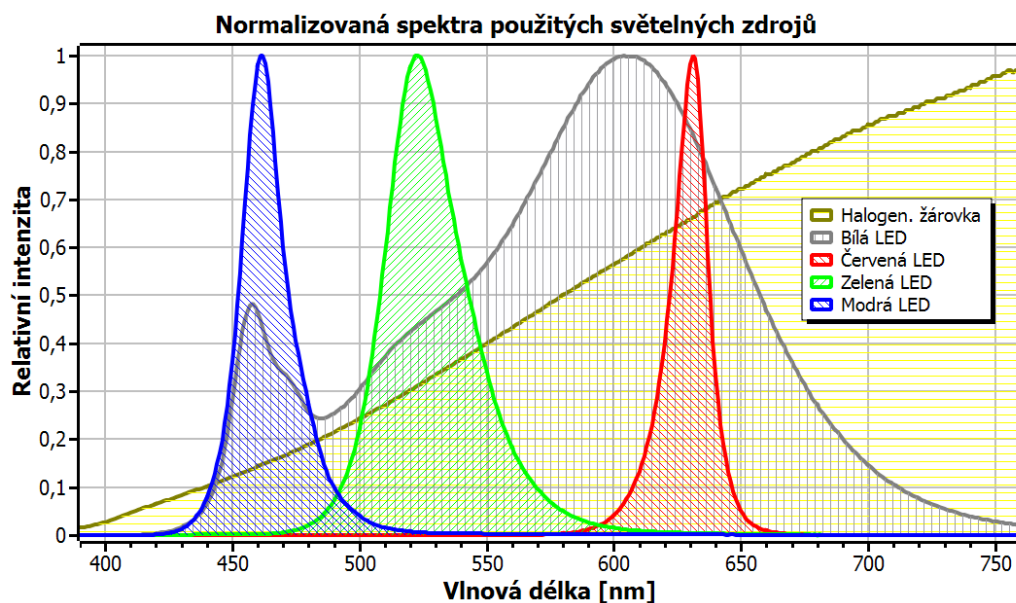


Obr. 11 – Kotouč 1

Pro popsané tři typy osvětlení byl také zkoumán vliv změny otáčení disku 1 (ve směru a proti směru hodinových ručiček) na sled subjektivních barev. Pokud se pořadí subjektivních barev otočilo na přesně opačné, byla vyhodnocena pravidelná změna sledu. Např. v jednom směru bylo pořadí: oranžová, zelená, fialová (od vnitřního prstence směrem ven) a v opačném směru rotace fialová, zelená, oranžová. K pravidelné změně sledu barev nedošlo, když se při změně rotace změnil také odstín jednoho nebo více prstenců, a to na jiný odstín nebo se prstenec stal bezbarvým (šedý či černý).

Poté se u stejného kotouče sledoval vliv barevného osvětlení na vjem subjektivních barev. V tmavé místnosti svítila pouze druhá lampa s LED žárovkou (stále stejná vzdálenost i úhel osvětlení), u které byla barva světla měněna z bílé na červenou, pak zelenou a nakonec modrou. U jednotlivých barevných osvětlení bylo sledováno, jestli se objeví subjektivní barvy, které výrazněji vybočují mimo relativně úzké spektrum osvětlovací LED žárovky, zda dojde k záměně sledu subjektivních barev při použití červeného světla ve srovnání s modrým osvětlením. Rychlost otáčení byla opět 8–9 ot/s. Spektrální vlastnosti použitých dvou žárovek byly změřeny pomocí přístroje Konica Minolta CS-2000 (zorné pole: 1°). Normalizovaná spektra jsou vyobrazena v grafu č. 1. Maximu intenzity modré LED žárovky odpovídala vlnová délka 461 nm, zelené 522 nm a červené 630 nm. Plná šířka v polovině maxima (FWHM) je u modré LED přibližně 20 nm, u zelené 36 nm a pro červenou asi 18 nm.

Graf č. 1 – Normalizovaná spektra použitých světelných zdrojů.



Dále byla zjišťována mezní rychlost rotace, kdy se barvy právě změň v černou nebo šedou. Byl použit kotouč 1 při osvětlení 2700 lx (podrobnosti viz Jednotlivé experimenty). Nejprve byl kotouč roztočen na 8–9 ot/s, kdy bylo zkontrolováno, jestli proband vidí subjektivní barvy. Poté byl postupně zpomalován (po krocích 1 ot/s) až proband hlásil, že vidí pouze černé nebo šedé pruhy. Potom byla nastavena opět rychlost 8–9 ot/s a po krocích 2 ot/s zvyšována až do doby, kdy figurant opět přestal barvy vidět.

#### 6.3.1.1. Výsledky experimentu 1

Snížení intenzity osvětlení se projevilo na vjemu subjektivních barev u 18 figurantů z 21, a to pro různý počet prstenců u každého figuranta (procentuální zastoupení uvedeno v tabulce 3). Zbylí tři probandi viděli subjektivní barvy stále stejné. Celkem bylo získáno 63 odpovědí (každý z 21 figurantů pozoroval 3 prstence). Změna subjektivních barev se projevila celkem u 35 prstenců, 14 z nich však nelze vyhodnotit, protože jeden z porovnávané dvojice prstenců byl popsán jako bezbarvý (šedý či černý). U 21 případů se změna vnímané barvy projevila buď změnou v odstínu, nebo v jas. Odstín subjektivní barvy se změnil ke kratší nebo delší vlnové délce nebo barva ztmavla či zesvětlala. Procentuální zastoupení čtyř různých změn, které mohly nastat, je vyjádřeno v tabulce 4.

Tab. 3 – Změna subjektivních barev při snížení intenzity osvětlení z 2700 lx na 40–80 lx a při zvýšení intenzity z 2700 lx na 4500 lx se projevila u různého počtu prstenců pro každého z 21 figurantů. Počet změn je vyjádřen procentuálně pro různé počty prstenců.

| Počet prstenců se změnou subj. barev | 0      | 1      | 2      | 3      |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Změna při snížení osvětlení          | 14,3 % | 33,3 % | 23,8 % | 28,6 % |
| Změna při zvýšení osvětlení          | 38,1 % | 47,6 % | 9,5 %  | 4,8 %  |

Tab. 4 – Při snížení intenzity osvětlení z 2700 lx na 40–80 lx došlo u 21 prstenců ke změně odstínu nebo ke změně jasu subjektivní barvy. Počet těchto změn je vyjádřen procentuálně. Při zvýšení intenzity z 2700 lx na 4500 lx se objevil stejný typ změn avšak jen u 12 prstenců. Zaznamenáno opět v procentech.

| Změna subjektivní barvy          | Od teplejších barev ke studenějším | Od studenějších barev k teplejším | Snížení jasu | Zvýšení jasu |
|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------|--------------|
| Počet změn při snížení osvětlení | 23,81 %                            | 57,14 %                           | 14,29 %      | 4,76 %       |
| Počet změn při zvýšení osvětlení | 58,33 %                            | 33,33 %                           | 0 %          | 8,33 %       |

Vliv zvýšení intenzity osvětlení zaznamenalo 13 probandů (z 21) u 17 prstenců. Pět změn nelze vyhodnotit, protože jeden z dvojice prstenců byl opět označen jako bezbarvý (konkrétně šedý). Jednotlivé změny jsou stejné jako při snižování intenzity osvětlení a jsou popsány výše. Procentuální zastoupení změn pro různý počet prstenců je zapsán v tabulce 3. Změny ve vlnové délce a jasu subjektivních barev jsou také v procentech uvedeny v tabulce 4.

Vliv změny směru rotace na sled subjektivních barev byl vyhodnocen pro každé ze tří různých typů osvětlení zvlášť (pro osvětlení 40–80, 2700 a 4500 lx) pokaždé pro 21 probandů. Pravidelná změna pořadí subjektivních barev na prstencích byla procentuálně vyjádřena a zaznamenána do tabulky 5. I když se v některých případech

při změně směru otáčení změnil odstín některého z prstenců, takže nebyla zaznamenána „pravidelná změna“, přesto došlo v naprosté většině k převrácení sledu barev.

Tab. 5 – Procentuální vyjádření pravidelné změny pořadí subjektivních barev při změně směru otáčení kotouče 1 pro tři různá osvětlení (u každého typu osvětlení vypočteno pro 21 probandů).

| Osvětlení kotouče /<br>lx                                         | 40-80   | 2 700   | 4 500   |
|-------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|
| <b>Změna sledu<br/>subjektivních barev<br/>/ procento případů</b> | 66,67 % | 66,67 % | 80,95 % |

Při osvětlování kotouče 1 červeným, zeleným a modrým světlem pomocí LED žárovky docházelo u jednotlivých účastníků studie k velmi rozdílným vjemům. Jeden proband například vnímal pouze šedé a černé prstence. Při otáčení ve směru hodinových ručiček označil prstence jako dva šedé a jeden černý v pořadí od vnitřního k vnějšímu. Jiný zase vnímal jeden nebo dva prstence jako modré a ostatní šedé či černé, ať se na kotouč svítilo červeně, zeleně nebo modře. U figurantů, u kterých byly nalezeny podobné vjemy subjektivních barev při jednom typu osvětlení, nebyly nalezeny žádné podobnosti mezi vjemy subjektivních barev při dalších dvou typech osvětlení. Každý figurant vnímal subjektivní barvy pod různě barveným osvětlením jinak. U všech třech barevných osvětlení a všech probandů byly subjektivní barvy zaznamenány na kotouči otáčejícím se ve směru a proti směru hodinových ručiček. Pravidelná změna pořadí subjektivních barev, jak se objevují na kotouči, která vzniká při změně směru otáčení, byla pro každý z uvedeného typu osvětlení a 21 figurantů spočítána v procentech. Pro červené osvětlení činí 66,67 %, pro modré 57,14 % a zelené 71,43 %. Pokud bereme v úvahu jen směr otáčení ve směru hodinových ručiček, hodnotil každý účastník výzkumu v tomto experimentu barvu třech prstenců při třech různých osvětleních, tj. devět prstenců. Součet pozorovaných prstenců v rámci tohoto konkrétního výzkumu pro všech 21 probandů činil 189, z toho 33,9 % linek viděli figuranti bez subjektivní barvy (šedě nebo černě). Zhruba polovina probandů viděla bezbarvý alespoň jeden prstenec při jednom typu osvětlení. Osvit červeným světlem vyvolával kromě červených a oranžových odstínů vjem modré, zelené a žluté. Osvit zelenou LED žárovkou vyvolal kromě zelené barvy nejčastěji modrou (ve 12 případech z 21), z 83,33 % na vnitřním

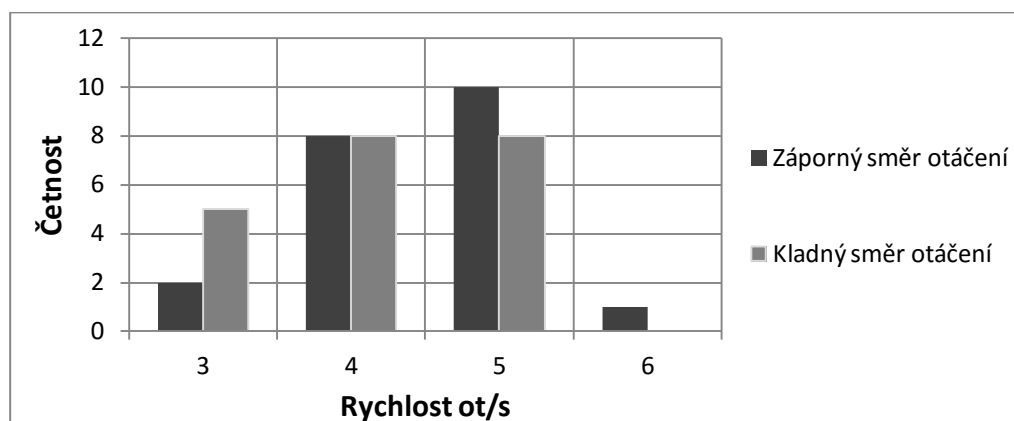
prstenci. Vznikaly však také žlutá, žlutozelená, žlutooranžová, oranžová, červená, modrozelená či fialová. Při použití modré LED žárovky byly zaznamenány v 11 případech (z 21) pouze modré subjektivní barvy, ale někteří figuranti vnímali i oranžovou, červenou, červenohnědou, zelenou, modrofialovou a fialovou. K záměně sledu subjektivních barev při použití červeného světla ve srovnání se stejnou situací a stejným směrem otáčení při osvětlení modrým světlem nedošlo ani v jednom případě.

Průměrné mezní rychlosti otáčení disku, při kterých subjektivní barvy právě mizí, společně se směrodatnými odchylkami jsou vyznačeny v tabulce 6 (měřeno při osvětlení 2700 lx). Když se rychlost snižuje, vidí 19 z 21 figurantů (90,5 %) nakonec všechny prstence černé (v obou směrech otáčení). Dolní mezní rychlosti jsou zaznamenány v grafu 2. Zvyšování rychlosti (při otáčení ve směru hodinových ručiček) změnilo barvu pruhů od vnitřního k vnějšímu v šedou, šedou, černou asi u 60 % figurantů. Opačný směr rotace se pak u zhruba stejného počtu figurantů projevil opačným pořadím – černou, šedou, šedou. Horní mezní rychlosti jsou vyobrazeny v grafu 3. Jeden z figurantů zaznamenal subjektivní barvu i v mezních rychlostech. Viděl stále oranžovou barvu u vnitřního prstence, při otáčení ve směru hodinových ručiček, a hnědou barvu u vnějšího prstence v opačném směru. Třem probandům subjektivní barvy nezmizely při zvyšování rychlosti otáčení, avšak pouze v jednom směru, v opačném směru rotace barvy zmizely. Jednomu z nich se změnily všechny barvy do šedobéžova, jinému jen zesvětlaly a dalšímu se neztratila tmavě modrá barva z vnitřního prstence (rotace proti směru hodin. ručiček).

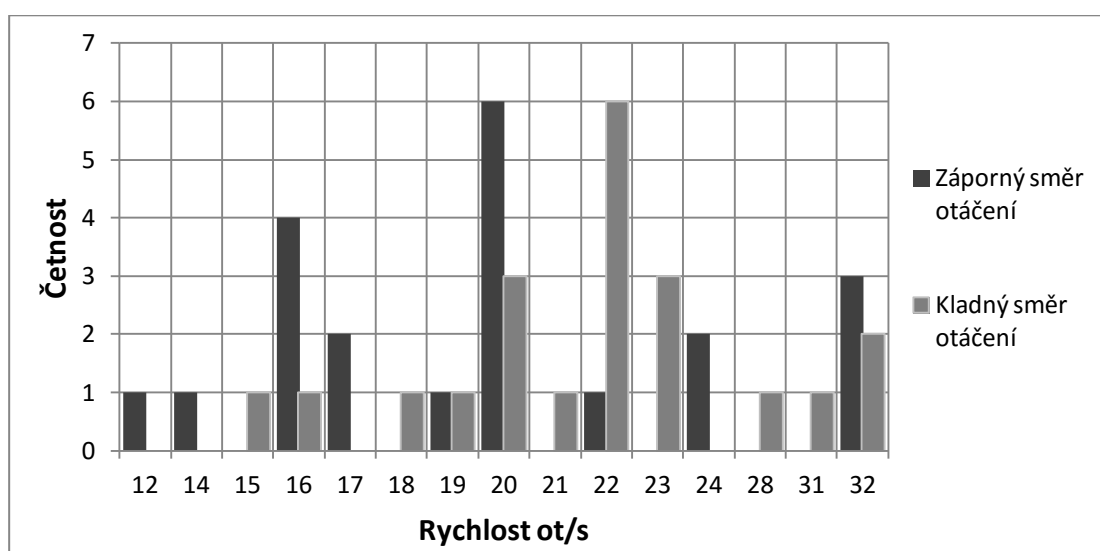
Tab. 6 – Průměrné mezní rychlosti otáčení disku, při kterých subjektivní barvy právě zmizí, vypočtené v obou směrech rotace (měřené při 2700 lx) a jejich směrodatné odchylky.

|                                           | <b>OTÁČENÍ VE SMĚRU<br/>HODINOVÝCH RUČÍČEK</b> |         | <b>PROTI SMĚRU HODINOVÝCH<br/>RUČÍČEK</b> |         |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------|---------|-------------------------------------------|---------|
| <b>Průměrná mezní<br/>rychlost v ot/s</b> | 4,14                                           | 22,52   | 4,48                                      | 20,43   |
| <b>Směrodatná<br/>odchylka</b>            | 0,7737                                         | 4,5630  | 0,7315                                    | 5,5512  |
| <b>Nejzazší hodnoty<br/>(ot/s)</b>        | 3 a 5                                          | 15 a 32 | 3 a 6                                     | 12 a 32 |

Graf 2 – Dolní mezní rychlosti pro záporný a kladný směr otáčení.



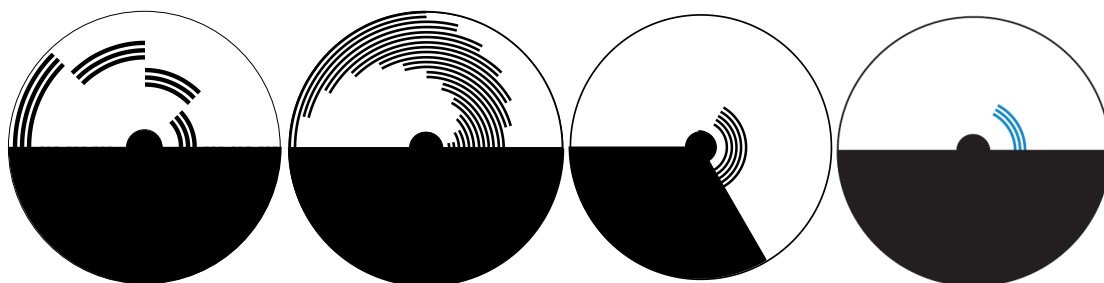
Graf 3 – Horní mezní rychlosti pro záporný a kladný směr otáčení.



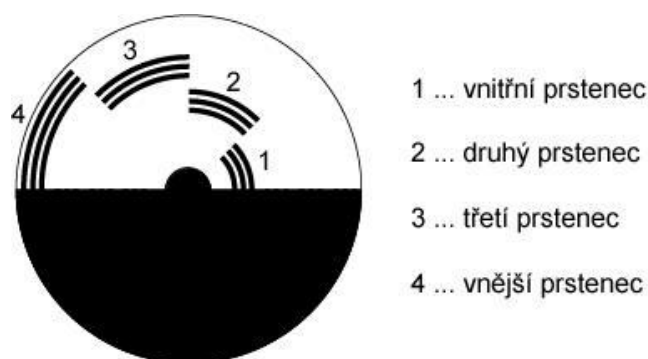
### 6.3.2. Experiment 2

V rámci druhého experimentu byl pozorován kotouč 2A a kotouče 2B, 2C a 2D (obr. 12) byly porovnávány s kotoučem 1 (na obr. 11, str. 33). Kotouč 2A vychází z původního Benhamova disku tvořeného čtyřmi trojicemi prstenců (viz obr. 13), tloušťka čar je necelý 1 mm. Benhamův disk pozorovali již Von Campenhausen a Schramme [13] nebo Abney [22] a výsledky, které uvedli, se liší pro třetí prstenec (od středu). Při otáčení disku ve směru hodinových ručiček shodně zaznamenali u vnitřního prstence červenou, druhého zelenou a u vnějšího tmavě fialovou. Třetí

prstenec však každý viděl jinak, buď světle modrý nebo šedý či světle fialový. Proto byly na kotouči 2A při rotaci ve směru hodinových ručiček sledovány subjektivní barvy a byly porovnány s uvedenými výsledky z předchozích studií [13] a [22]. Kotouč 2B je tvořen několika prstenci o tloušťce asi 0,5 mm lišících se délkou a polohou, a které na sebe navazují. Bylo zjišťováno, zda se na něm objeví odlišné či stejné subjektivní barvy jako na kotouči 1, a zda bude přechod mezi barvami u disku 2B plynulý. Dále byl zkoumán vliv zmenšení černé plochy kotouče na vjem subjektivních barev. K tomu posloužil kotouč 2C, kde černá tvoří pouze třetinu plochy kotouče a prstence o tloušťce asi 0,5 mm zaujímají rozsah 120°. Subjektivní barva odpovídající této skupince prstenců byla porovnávána s vnímanou barvou na vnitřním prstenci kotouče 1. Bylo zjišťováno, zda došlo u barev na kotouči 2C k posunu ve vlnové délce. Doplnujícím experimentem bylo zjištění, jestli bude mít barva prstence vliv na vjem subjektivní barvy. To bylo realizováno pomocí kotouče 2D, na kterém zasahuje trojice modrých prstenců (široké 0,5 mm) do jedné třetiny bílé plochy (60°). Opět byla subjektivní barva vzniklá na této trojici porovnávána s vnitřním prstencem kotouče 1 při rotaci obou disků ve směru hodinových ručiček.



Obr. 12 – Kotouč 2A, 2B, 2C, 2D (v tomto pořadí)

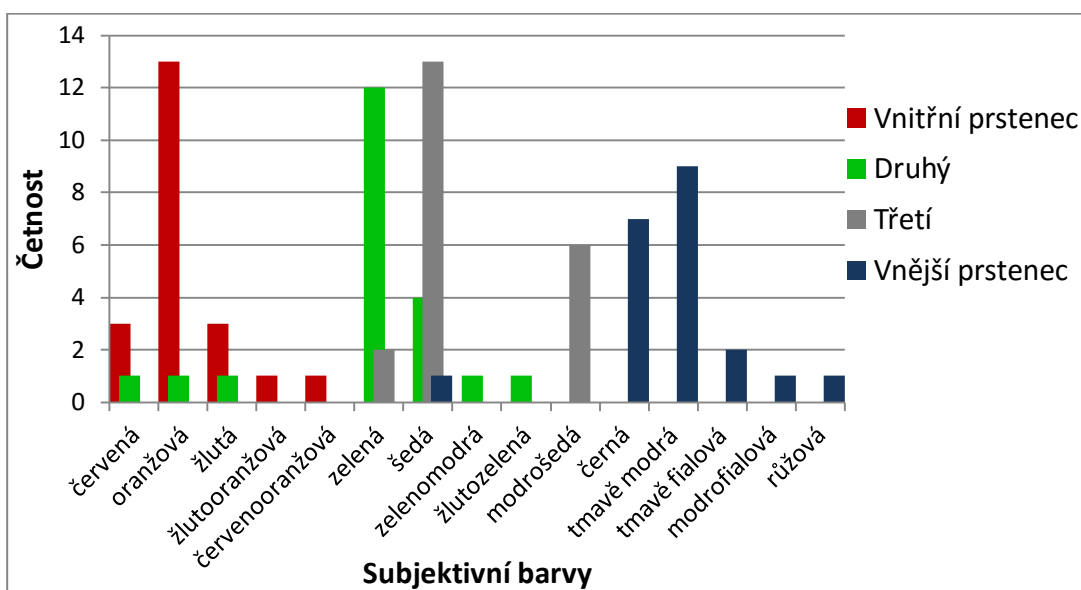


Obr. 13 – Kotouč 2A s popisem prstenců

### 6.3.2.1. Výsledky experimentu 2

Kromě kotouče 2D byly všechny výsledky v rámci druhého experimentu zpracovávány pro 21 figurantů. Na prstencích Benhamova disku (obr. 5, str. 16) byly z předchozích studií popsány subjektivní barvy (od vnitřního k vnějšímu a při rotaci ve směru hodin. ručiček) jako červená, zelená, na třetím prstenci světle modrá, šedá či světle fialová a na vnějším tmavě fialová. Subjektivní barvy, které uvedli probandi v této studii na kotouči 2A (obr. 13, předchozí strana), jsou zobrazeny v grafu 4. Červená byla zaznamenána u vnitřního prstence pouze třikrát, zelená u druhého prstence ve 12 případech, tmavě fialová u vnějšího pouze dvakrát. Třetí prstenec měl šestkrát nádech modrošedý, šedý u 13 probandů, světle fialový ani jednou.

Graf 4 – Graf zobrazuje, jaké subjektivní barvy byly zaznamenány 21 figuranty u jednotlivých prstenců kotouče 2A a kolikrát.



Kotouč 2B na obr. 12 a str. 39 při otáčení ve směru hodinových ručiček vytvářel přibližně stejné barvy jako kotouč 1, u kterého vzniká vjem teplých barev na vnitřním prstenci a mění se ve vjem studených barev na prostředním a vnějším prstenci. Nejčastěji se jedná o oranžovou barvu (62 %) pro vnitřní oblouk. U druhého prstence se objevuje nejvíce modrá (33,3 %) a zelená (33,3 %), které přechází na vnějším prstenci do tmavě modré (u 52,4 %) nebo fialové (pro 33,3 % z 21 figurantů). V případě disku 2B se objevuje plynulý přechod od teplých po studené barvy u 90,5 % figurantů. Nejčastěji

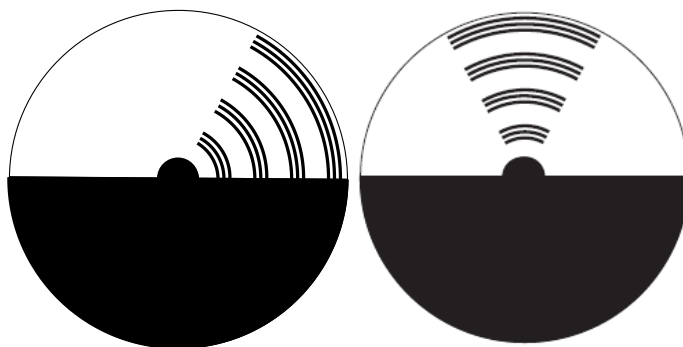
udávali opět oranžovou (v 76,2 %). Modrou v prostřední části disku nahradila zelená, která se zde objevovala v 76,2 %. Koncová část kotouče 2B odpovídající vnějšímu prstenci na kotouči 1 vytvářela modrou ve 23,8 % případů a fialovou v 19 %. V těchto místech kotouče vnímali figuranti nejčastěji šedou a černou (dohromady ve 38,1 % případů). Nové barvy na disku 2B, které nebyly na kotouči 1, jsou zelenomodrá (zaznamenaná dvakrát) a žlutozelená (viděna jednou).

Subjektivní barvy tvořené oblouky na disku 2C byly porovnávány s těmi, které vytvářely vnitřní prstence na kotouči 1. Při rotaci ve směru hodinových ručiček nenahlásilo šest figurantů (z 21) žádnou změnu subjektivní barvy. Ve čtyřech případech se barva ztratila (prstenec kotouče 2C byl černý nebo šedý). U sedmi probandů došlo na kotouči 2C ke ztmavnutí vnímané barvy, u jednoho k zesvětlení. Změny v odstínech subjektivních barev byly zaznamenány pouze ve třech případech. Dvakrát došlo k posunu k teplejším odstínům a jednou ke studenějšímu. Při rotaci proti směru hodinových ručiček neuvedlo 15 figurantů žádnou změnu, tři nahlásili tmavší barvu na kotouči 2C, jeden světlejší. Jen ve dvou případech došlo k posunu v barvě na teplejší odstín. Předpokládané zvýraznění kratších „vlnových délek“ u kotouče 2C se tedy neprokázalo.

V doplňujícím experimentu byly zkoumány subjektivní barvy pomocí disku 2D. Jeho modré prstence odpovídají vnitřním obloukům na kotouči 1. Jak už bylo řečeno, na vnitřních prstencích kotouče 1 vzniká při rotaci ve směru hodinových ručiček nejčastěji vjem oranžové barvy (u 61,9 % figurantů), méně často červené, červenooranžové a žluté. Disk 2D při otáčení ve stejném směru vytváří vjem velmi jasné bílé či světle šedé u všech 10 figurantů. Tři probandi uvedli červený nádech, dva růžový, jeden žlutý a jeden modrý nádech. Všichni se však shodují na tom, že je jasnější než bílé pozadí.

### 6.3.3. Experiment 3

Ve třetím experimentu se zkoumal vliv radiální vzdálenosti prstenců na vjem subjektivních barev za použití kotoučů 3A a 3B (obr. 14). Bílá plocha kotouče byla pomyslně rozdělena na tři sektory po šedesáti stupních. Trojice prstenců o stejné šířce (0,5 mm) byly vytvořeny v různých vzdálenostech od středu, ale vždy ve stejném sektoru. U jednotlivých trojic pak byla zkoumána závislost radiální vzdálenosti prstence na vjemu subjektivní barvy.



Obr. 14 – Kotouče 3A a 3B

#### 6.3.3.1. Výsledky experimentu 3

Vliv radiální vzdálenosti oblouků od středu kotouče na vjem subjektivních barev se neprokázal. U kotouče 3A i 3B (obr. 14) byly všechny prstence při obou směrech otáčení viděny se stejnou subjektivní barvou. Navíc subjektivní barvy zaznamenané u jednotlivých 21 figurantů na disku 3A odpovídají barvám, které vznikají na vnitřním oblouku kotouče 1. Pokud se disky otáčejí ve směru hodinových ručiček, objevují se teplé barvy. Na kotouči 3A je nejčastěji vidět oranžová barva (u 81 % figurantů). Když se kotouč 3A otáčí proti směru hodinových ručiček, vzniká na všech prstencích nejčastěji modrá barva (pro 71 % figurantů). To odpovídá vnitřnímu prstenci kotouče 1 při otáčení proti směru hodinových ručiček. V takovém případě totiž vzniká u 67 % figurantů modrá barva. Jak bylo ukázáno v předchozích experimentech, vliv má pouze poloha oblouku v rámci bílé plochy kotouče, tzn. důležité je, ve kterém sektoru prstenec leží. Na disku 3B byly vidět u všech 21 figurantů stejné barvy, i když se otáčel opačným směrem. Nejčastěji se jednalo o zelenou subjektivní barvu (pro 52 % figurantů).

#### 6.3.4. Experiment 4

Čtvrtý experiment zjišťoval vliv délky prstenců na vjem subjektivních barev. V tomto případě byly použity kotouče vyobrazené na obr. 15. Ve všech případech je šířka prstenců asi 0,5 mm. U kotoučů 4A a 4B byly trojice prstenců vytvořeny v různých vzdálenostech od středu disku a v různých délkách. Rozsahy jednotlivých oblouků od nejmenšího jsou: 25°, 45°, 60°, 75°. Okraje prstenců na disku 4B svírají s lemem černého pozadí úhel 60°. Kotouč 4C je tvořen skupinou prstenců zasahujících do poloviny bílého pozadí, jejich rozsah je tedy 90°. Vjem subjektivních barev byl

u tohoto kotouče porovnáván s vjemem vznikajícím na vnitřním prstenci kotouče 1 (obr. 11, str. 33). Předpokládali jsme, že subjektivní barva bude u kotouče 4C tmavší než u kotouče 1.



Obr. 15 – Kotouče 4A, 4B, 4C (v tomto pořadí)

#### 6.3.4.1. Výsledky experimentu 4

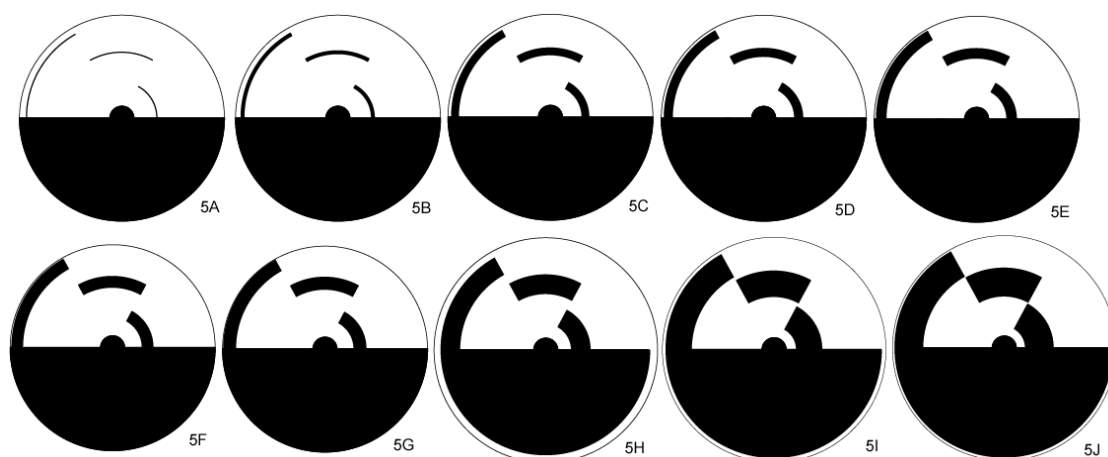
Délka prstenců má vliv na jas subjektivních barev. Čím delší je oblouk, tím tmavší barva vzniká. Všechny 21 figurantů hlásilo postupné tmavnutí subjektivní barvy u disku 4A, když se otáčel ve směru hodinových ručiček, a u disku 4B při otáčení v obou směrech. Postupná změna od světlejších ke tmavším subjektivním barvám na disku 4A (při otáčení proti směru hodinových ručiček) byla zaznamenána u 61,9 % figurantů. V tomto případě vidělo 23,8 % účastníků studie všechny prstence stejné a 14,3 % vnímalo nejkratší prstenec nejsvětlejší, ale ostatní oblouky stejně jasné. Disk 4C vykazoval velkou variabilitu ve vnímaných barvách mezi jednotlivými probandy. Předpoklad, že subjektivní barvy na kotouči 4C budou tmavší než barvy na vnitřním prstenci kotouče 1, se nepotvrdil. Subjektivní barvy zaznamenané na kotouči 4C vykazovaly několik změn, které zobrazuje tabulka 7 pro oba směry otáčení.

Tab. 7 – Rozdíly mezi subjektivními barvami, které vznikají na vnitřních obloucích kotouče 1 a těmi, které vznikají na prstencích kotouče 4C se projevily různě. Změna odstínu, změna jasu barvy, změna na bezbarvý prstenec či žádná změna na kotouči 4C jsou vyjádřeny v procentech pro 21 probandů.

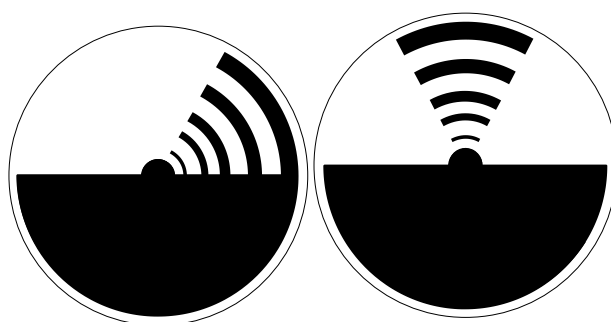
| Typ změny subjektivních barev         | Ze studenějšího odstínu na teplejší | Z teplejšího odstínu na studenější | Snížení jasu barvy | Zvýšení jasu barvy | Prstenec se stal bezbarvým | Beze změny |
|---------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------|----------------------------|------------|
| Rotace ve směru hodinových ručiček    | 9,52%                               | 38,10%                             | 14,29%             | 4,76%              | 4,76%                      | 28,57%     |
| Rotace proti směru hodinových ručiček | 9,52%                               | 4,76%                              | 19,05%             | 4,76%              | 4,76%                      | 57,14%     |

### 6.3.5. Experiment 5

V rámci pátého experimentu byl zkoumán vliv tloušťky čar na vjem subjektivních barev. Byly použity kotouče zobrazující tři samostatné prstence v rozsahu 60°, podobně jako Grunfeld a Spitzer [30]. Šířka prstenců byla po několika krocích zvětšována až do stavu, kdy se prstence téměř dotýkaly svými rohy (viz obr. 16). Byly použity kotouče s prstenci o tloušťkách: 0,5 mm; 1 mm; 2 mm; 2,3 mm; 2,7 mm; 3 mm; 3,3 mm; 5 mm; 7 mm; 7,7 mm. Očekávali jsme, že od určité šířky prstence se barva omezí jen na jeho okraj a vnitřní část linky bude bezbarvá, jak to uvádí Bidwell [16]. Stejný typ pozorování byl prováděn na kotoučích 5.2A a 5.2B (na obr. 17), ty však obsahují několik prstenců o různé tloušťce umístěných do stejného sektoru bílé plochy, ale v různých radiálních vzdálenostech. Šířka pruhů se zvětšuje od středu směrem k vnějšímu okraji disku a činí přibližně 0,5 mm; 1,3 mm; 2 mm; 2,7 mm; 3,3 mm.

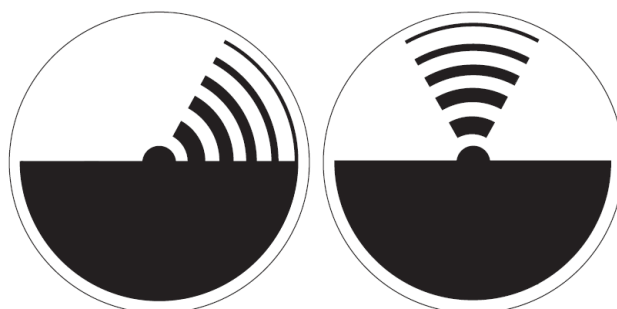


Obr. 16 – Kotouče 5A až 5J



Obr. 17 – Kotouče 5.2A a 5.2B

Tento experiment byl doplněn ještě o pozorování kotoučů 5.3A a 5.3B na obrázku 18, které vychází ze struktury kotoučů 5.2A a 5.2B. Tloušťka prstenců je ale v tomto případě největší ve středu disku a směrem k vnějšímu okraji se ztenčuje.

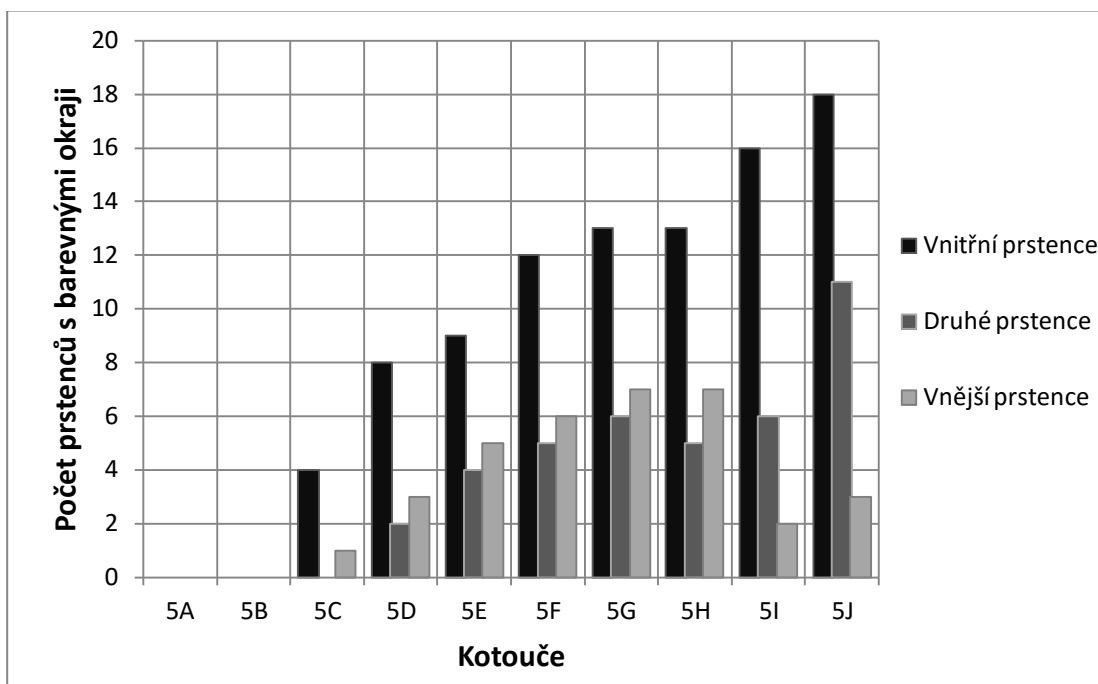


Obr. 18 – Kotouče 5.3A a 5.3B

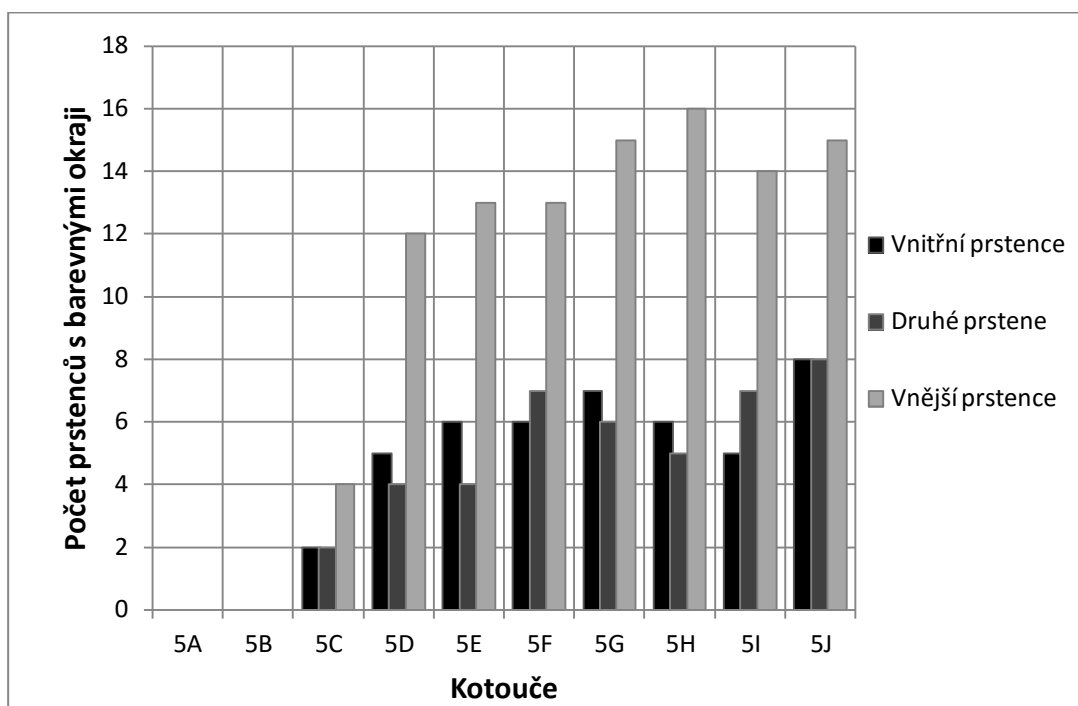
### 6.3.5.1. Výsledky experimentu 5

Pokud je tloušťka prstenců postupně zvětšována, ve většině případů existuje hranice, na které přestává být prstenec vnímán barevný celý, ale barva se omezuje jen na okraje (někdy jeden okraj). V tomto výzkumu se ukázalo, že toto pravidlo neplatí pro všechny tři prstence vyobrazené na jednom kotouči stejně. Nepravidelnosti jsou také v tom, jak vnímají probandi barevné okraje prstenců. Do určité tloušťky je prstenec vnímán barevný celý, pak je subjektivní barva vidět jen na jeho okrajích a vnitřní část prstence je bezbarvá (šedá či černá) anebo je prstenec stále barevný celý, ale jeho okraje jsou výraznější – jasnější, světlejší či tmavší, avšak stejného odstínu. Nejčastěji je barevný lem vnímán u kotoučů 5C až 5J (obr. 16, str. 45) u vnitřních prstenců při otáčení ve směru hodinových ručiček a u jejich ekvivalentů (vnějších prstenců) při rotaci proti směru hodinových ručiček. Většina probandů viděla na určitém kotouči (z kotoučů 5C až 5J) barevné okraje u jednoho až dvou prstenců. Minimálně jeden prstenec byl na drtivě většině kotoučů barevný celý, ať byla jeho tloušťka jakákoli. V grafech 5 a 6 jsou zaznamenány (pro různé směry rotace disků) počty prstenců, u kterých byl vidět barevný okraj. Tzn., buď na prstenci byl barevný pouze okraj (jeden nebo oba) a jeho vnitřní část byla bezbarvá nebo byl prstenec barevný celý, ale jeho okraje byly výraznější. Nejčastěji byly barevné okraje pozorovány na prstencích kotouče 5J.

Graf 5 – Počty prstenců s barevnými okraji u jednotlivých kotoučů zaznamenané při otáčení ve směru hodinových ručiček.

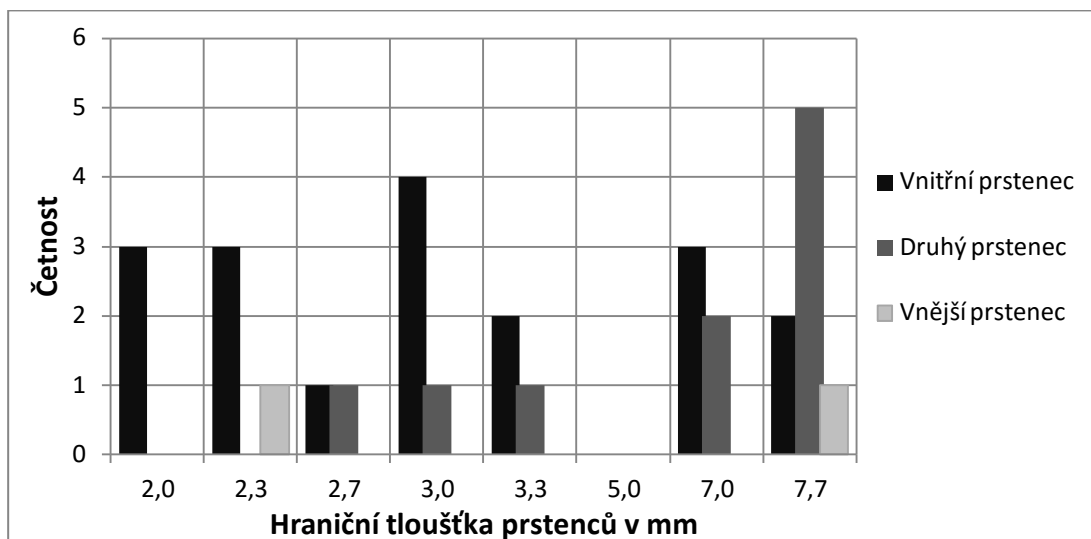


Graf 6 – Počty prstenců s barevnými okraji u jednotlivých kotoučů zaznamenané při otáčení proti směru hodinových ručiček.



Hraniční tloušťku prstenců, od které je subjektivní barva vnímána pouze na okrajích prstenců, nelze stanovit pro jednotlivé kotouče, pouze pro jednotlivé prstence. Různé hraniční tloušťky vnitřních, druhých a vnějších prstenců (pro 19 figurantů) při otáčení ve směru hodinových ručiček byly zaznamenány do grafu 8. Výsledky dvou měření nemohly být započítány. Jeden figurant viděl všechny prstence při všech tloušťkách buď celé barevné či celé bezbarvé. Jiný viděl barevné okraje pouze u prstenců o šířce 2,7; 3,0 a 3,3 mm, tenčí a širší prstence viděl barevné v plné tloušťce. Dále byla u sedmi figurantů (z 19) na kotoučích 5C až 5I zaznamenána zvláštní pozorování. U jednoho nebo dvou prstenců viděli barevné okraje pouze při určitých tloušťkách. Většinou se jednalo o druhé a vnější prstence. Nejčastěji byl takový prstenec vnímán do určité tloušťky barevný celý, pak se na několika kotoučích jevil černý s barevným okrajem a při větší šířce prstence už jen černý.

Graf 8 – Hraniční tloušťky u vnitřních, druhých a vnějších prstenců zaznamenané pro 19 figurantů při otáčení disků ve směru hodinových ručiček.

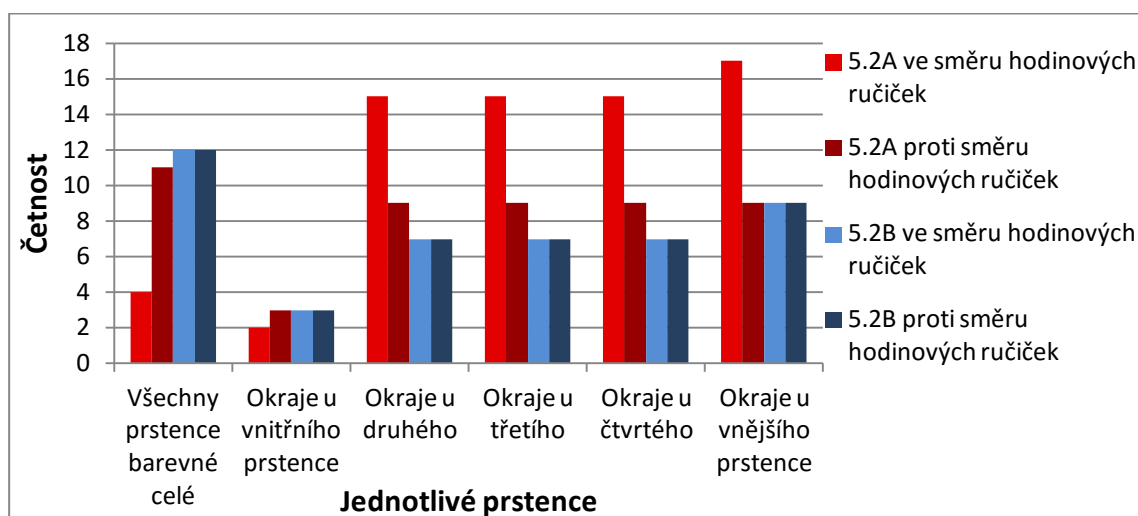


Vliv různé šířky prstence na vjem subjektivní barvy byl také zkoumán pomocí kotoučů 5.2A a 5.2B (obr. 17, str. 45). Oblouky kotouče 5.2A při otáčení ve směru hodinových ručiček vyvolávají vjem teplých barev. V tomto směru otáčení vidělo 19,1 % z 21 figurantů všechny prstence barevné v plné tloušťce; 9,5 % jich vidělo barevné okraje u všech prstenců; 9,5 % okraje jen u vnějšího prstence a 61,9 % probandů vidělo okraje u všech prstenců kromě vnitřního, ten viděli barevný celý. Jak ukazuje graf 8, nejčastěji se subjektivní barvy vyskytují při okrajích vnějšího oblouku, nejméně u vnitřního. Disk 5.2A rotující proti směru hodinových ručiček vyvolává nejčastěji vjem tmavě modrých barev. V tomto směru rotace vidělo 52,4 % figurantů všechny prstence barevné celé; 9,5 % vnímalo okraje u všech prstenců; 4,8 % jen u vnějšího prstence; 28,6 % u všech prstenců kromě vnitřního a 4,8 % u všech kromě vnějšího. Kotouč 5.2B vyvolává v obou směrech rotace stejný vjem (u všech 21 figurantů): pro 57,1 % probandů jsou všechny prstence celé barevné; 14,3 % probandů vidí okraje u všech prstenců; 19,1 % u všech prstenců kromě vnitřního a 9,5 % jich vnímá okraje jen u vnějšího prstence. Všechny procentuální údaje uvedené v tomto odstavci jsou přehledně seřazeny v tabulce 8.

Tab. 8 – Tabulka zachycuje v procentech (na 21 figurantů) různé případy, kdy viděli probandi barevné okraje na kotoučích 5.2A pro dva směry rotace a 5.2B v libovolném směru (pro oba směry byly naměřeny stejné hodnoty). Ostatní prstence viděli barevné celé.

| Kotouč a směr rotace    | Okraje u všech prstenců | Okraje u všech kromě vnitřního | Okraje jen u vnějšího prstence | Okraje u všech kromě vnějšího | Všechny prstence barevné celé |
|-------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 5.2A v kladném směru    | 9,5%                    | 61,9%                          | 9,5%                           | 0,0%                          | 19,1%                         |
| 5.2A v záporném směru   | 9,5%                    | 28,6%                          | 4,8%                           | 4,8%                          | 52,4%                         |
| 5.2B v libovolném směru | 14,3%                   | 19,1%                          | 9,5%                           | 0,0%                          | 57,1%                         |

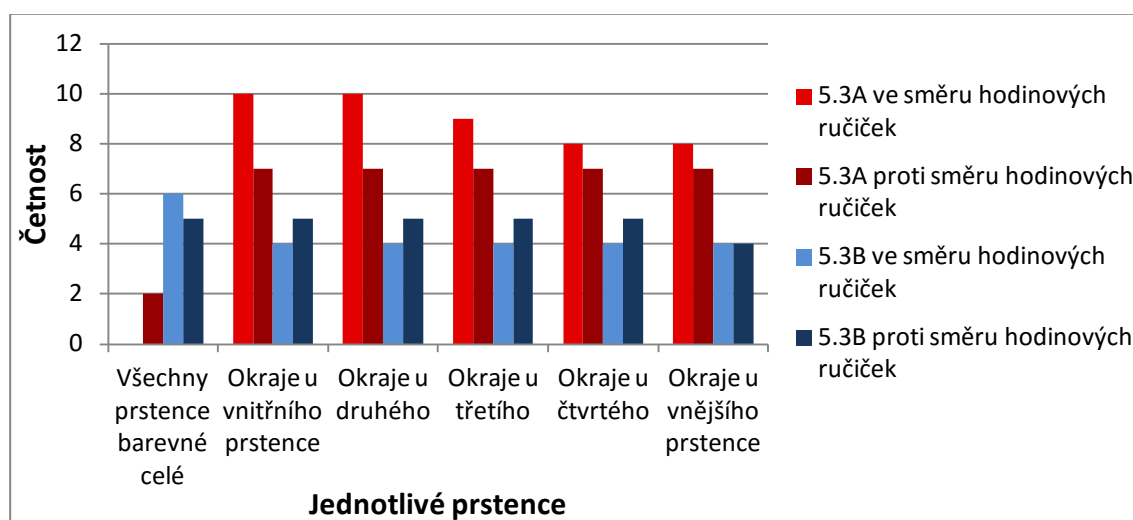
Graf 8 – Četnost prstenců s barevnými okraji na kotoučích 5.2A a 5.2B v obou směrech rotace pro 21 probandů. Prstence jsou seřazeny zleva doprava od vnitřního po nejvíce vnější.



Doplňujícího experimentu s pozorováním kotoučů 5.3A a 5.3B (obr. 18, str. 45) se zúčastnilo pouze 10 probandů. Oblouky na kotouči 5.3A odpovídají těm na kotouči 5.2A, jsou prohozeny pouze tloušťky jednotlivých prstenců. Při otáčení tohoto disku ve směru hodinových ručiček vidělo 80 % figurantů barevné okraje u všech prstenců. Proti směru hodinových ručiček zaznamenalo totéž 60 % probandů a 20 % vidělo všechny prstence barevné celé. Vjem vyvolaný kotoučem 5.3B je shodný pro oba směry

otáčení u 90 % probandů. V kladném směru otáčení zaznamenalo 40 % figurantů barevné okraje u všech prstenců a 60 % vidělo všechny prstence barevné v plné tloušťce. Graf 9 ukazuje, že na rozdíl od disků 5.2A a 5.2B barevné okraje jsou vidět u vnitřních i vnějších prstenců zhruba stejně často.

Graf 9 – Četnost prstenců s barevnými okraji na kotoučích 5.3A a 5.3B v obou směrech rotace pro 10 probandů. Prstence jsou seřazeny zleva doprava od vnitřního po nejvíce vnější.



### 6.3.6. Doplnující experimenty

V rámci doplňujících experimentů pozorovalo 10 probandů kotouč 1 střídavě jedním a druhým okem, ale ani jeden nepozoroval rozdíl v subjektivních barvách. Dále zastínili stejný kotouč clonkou, aby byl z disku vidět jen úzký pruh. Clona z černého papíru zakrývala celou plochu kotouče, aby byl vidět jen tenký proužek o šířce 7 mm a délce 29 mm. Barevný vjem zůstal opět nezměněn.

Do výzkumu byl také zahrnut jeden figurant s poruchou barvocitu. Jednalo se o slepotu pro zelenou barvu. Byly mu představeny jen některé vybrané kotouče, kotouč 1 (obr. 11, str. 33) a kotouč 2A (obr. 12, str. 39) při osvětlení 2700 lx a rotaci ve směru hodinových ručiček. Na těchto discích figurant vnímal červeně nebo hnědě proužky, které vidí v podobných odstínech i ostatní figuranti. Proužky vyvolávající u většiny pozorovatelů barvy do zelena nebo do modra, vnímal jako šedé.

## 6.4. Diskuze

Výsledky celkově ukazují, že úhlová vzdálenost mezi černou polovinou kotouče a počátkem černé čáry určuje subjektivní barvu, jakou bude prstenec vyvolávat. Na klasickém Benhamově disku (obr. 5, str. 16) se nejčastěji objevily barvy: oranžová, zelená, šedá, tmavě modrá (od vnitřního prstence vně, v kladném směru otáčení). Nezáleží na radiální vzdálenosti černé čáry od středu kotouče, ale záleží na délce černé čáry. Její délka ovlivňuje jas vnímané barvy. Čím je kratší, tím světlejší je iluzorní barva. Osvětlení kotoučů má vliv zejména na odstín subjektivní barvy. Při zeslabení intenzity osvětlení dochází k posunu k teplejším odstínům. Vyšší intenzita osvětlení posouvá vnímané barvy ke studenějším barvám. Barevné osvětlení působí na každého člověka individuálně, avšak může způsobit vznik barev, které nejsou obsaženy ve spektru světleného zdroje. V tomto výzkumu se nepodařilo potvrdit záměnu subjektivních barev na kotouči otáčejícím se jedním směrem pouze pomocí různě barevného osvětlení popsanou ve studii [23]. Průměrná rychlost rotace, při které iluzorní barvy z kotouče vymizí je 4 ot/s a 23 ot/s pro kladný směr otáčení (podle hodinových ručiček), pro opačný směr je to 4 ot/s a 20 ot/s. Změna směru otáčení pak vyvolává prohození pořadí subjektivních barev, jak jsou viděny na jednotlivých prstencích kotouče. Zmenšení černé plochy pozadí nemá velký vliv na vjem subjektivních barev. Když se oblouk, který na černo-bílém kotouči vyvolává většinou oranžovou iluzorní barvu, nahradí modrým obloukem, zůstane charakter barvy u většiny pozorovatelů stejný. Subjektivní barva je pouze jasnější. Rozšířením prstence se vjem barvy posouvá k okraji častěji u teplých barev, méně často u ostatních. Čím je prstenec širší, tím je vnímán tmavší až černý a barevný má pouze okraj.

Výsledky výzkumu ohledně snížení či zvýšení intenzity osvětlení se shodují s tvrzením Bagley [19], podle které se subjektivní barvy s jasným denním světlem mění ve studenější odstíny a při klesající intenzitě světla v teplejší. Použití barevného osvětlení vyvolává řadu otázek. Jednobarevné osvětlení vytvořené pomocí žlutého sodíkového plamene podle Benhama [17] vyvolalo modrou a červenou subjektivní barvu, což bylo následně popřeno Liveingem [15]. Použitím kvazimonochromatického osvětlení v této studii byly vyvolány takové subjektivní barvy, které použité spektrum neobsahovalo, což je v souladu s výsledky Benhama. U zelené LED žárovky je však použité spektrum relativně široké, tudíž některé subjektivní barvy jako žlutá a oranžová by mohly být

způsobeny vlivem osvětlení. Barevné osvětlení způsobuje, že se kotouč nejeví černo-bílý, ale černo-barevný podle použitého světla. Bagley [19] ve svém výzkumu používala disky napůl černé a napůl barevné. Např. při použití černo-červeného disku získala vjem zelených subjektivních barev. To ale nelze aplikovat na výsledky této studie, protože u Bagley se původně červené prstence změnilly v zelené. V této studii se za použití červeného světla jeví původně červené prstence u většiny figurantů stále červené. Zelená subjektivní barva vznikala na jiných prstencích. Změna sledu subjektivních barev na kotouči při změně vlnové délky osvětlení se nepotvrdila. Možným důvodem je odlišné spektrum použitého světla. Ve studii [23] bylo použito vlnových délek od 534 nm po 583 nm, zatímco v tomto výzkumu bylo porovnáváno pořadí subjektivních barev mezi červeným a modrým světlem. Jejich vlnové délky odpovídající maximu byly 630 a 461 nm.

Když se zmenší černé pozadí kotouče, dochází podle Bagley [19] ke zvýraznění studenějších odstínů subjektivních barev. To se v této studii nepotvrdilo. Většina probandů neviděla žádnou změnu oproti klasickému kotouči, kde černá tvoří polovinu disku. U některých došlo ke ztmavnutí vnímané barvy, ale to by mohlo být způsobeno tím, že na disku 2C (obr. 12, str. 39) byly použity delší oblouky, než na kotouči původním (kotouč 1, str. 33). Bylo totiž prokázáno, že délka prstenců ovlivňuje jas subjektivní barvy, což se shoduje se studií [19]. I když barvy vnímané na disku 4C (obr. 15, str. 43) tmavší nebyly. Většina hodnotila disk stejně jako vnitřní oblouk kotouče 1. Někteří figuranti (38,1 %) při porovnání těchto dvou prstenců zaznamenali odstíny barev na disku 4C o kratších „vlnových délkách“. To mohlo být způsobeno tím, že oblouky kotouče 4C zasahují až do poloviny bílé plochy pozadí, tedy do dalších sektorů, čímž posouvají vjem do jiných odstínů. Tento výsledek ukazuje, že výsledný odstín nemusí být ovlivněn pouze polohou oblouku vzhledem k pozadí, ale celkovou bílou plochou obklopující prstenec z obou stran [11].

Nahrazení černého prstence (který nejčastěji vyvolával vjem oranžové) modrým prstencem nezměnilo původní charakter barvy, stále byla subjektivní barva laděná do teplých barev. Pouze jeden figurant uvedl, že má oblouk modrý nádech. Pravděpodobně u něj převládl vjem modré.

Z výsledků vyplývá, že modré, fialové a zelené odstíny se špatně odlišují od černé nebo šedé, hlavně pokud je vnímaná barva tmavá. To může mít vliv na vjem okrajů u širších čar. U studených odstínů jsou barevné okraje vidět mnohem méně často

a prstenec se i při velké šířce jeví barevný celý. U těchto prstenců dochází také k nepravidelnostem, kdy se nejví barva od určité tloušťky pouze na okraji, ale kdy se barevné okraje při rozšíření prstenců naopak ztrácí. Oranžová je pravděpodobně dobře rozlišitelná od černé či šedé. Pokud se kroužek, který je vidět v odstínech oranžové, rozšíří, přesouvá se vjem barvy k okrajům prstence. Většinou je oblouk vidět šedě nebo černě a má pouze oranžové okraje. Tyto výsledky jsou v souladu s názory Bidwella [16], který tvrdí, že zesílené pruhy se jeví šedé nebo černé a subjektivní barvy se omezují jen na lem prstenců. Zdůrazňuje, že toto tvrzení platí zejména pro červenou barvu.

Jelikož se do výzkumu zapojil jen jeden proband s poruchou barvocitu, je vyhodnocení získaných dat značně problematické. Prstence, které by u trichromata vyvolaly vjem zelené barvy, vnímal tento figurant jako šedé. Protože to pro něj nebyla neobyčejná barva, lze předpokládat, že Benhamův disk není schopen vyvolat simulace barevných kódů, tak jak to stojí ve článku [27]. Avšak nejde prokázat, jestli se jednalo opravdu o barvu, kterou běžně vídá ve svém životě. Proto může být platná také teorie Von Campenhausena a Schrammeho [13], že je mozek člověka s poruchou barvocitu schopen vytvářet více barev, než na jaké reagují jeho fotoreceptory.

Zjištění, že jsou subjektivní barvy zachovány i při pohledu přes clonu, je v rozporu s poznatky studie [13], kde je kladen hlavní důraz na interakce na sítnici. Teorie o laterální inhibici (popsaná v kap. 5) nemusí být nepravdivá. Je jen více pravděpodobné, že místo vzniku Benhamovy iluze neleží pouze na sítnici, a že se na jejich generaci podílí i mozková kůra [9]. Z výsledků praktické části této práce nelze usoudit, která z teorií uvedených v kapitole 5 je pravdivá a která nikoliv. Lze pouze zopakovat, že rozdílná rychlost reakcí třech různých čípků nemůže sama o sobě vysvětlit vznik subjektivních barev. A je pravděpodobné, že vjem subjektivních barev je vyvolán spoluprací několika míst zrakové dráhy.

## ZÁVĚR

Cílem teoretické části práce bylo popsat Benhamovu iluzi a jev subjektivních barev. Úvod práce se zabýval zpracováním obrazu sítnicí, jeho přenosem ve zrakové dráze a s tím spojené procesy, které jsou považovány za hlavní příčiny vzniku Benhamovy iluze. Dále byl definován odstín, jas a sytost barvy, teorie spojené se zpracováním barvy lidským okem a poruchy barvocitu, které mohou nastat. Byla odhalena historie klamu, počátky jeho zkoumání, jednotlivé okolní podmínky, které mohou vjem iluze změnit či zničit. Byly shrnuty vlivy rychlosti otáčení disku, jak působí různá intenzita či barva osvětlení. Účinky rozmístění prstenců v rámci kotouče, jejich šířky, délky. Také uspořádání černo-bílého pozadí nebo vliv barevné změny na pozadí. Bylo nastíněno vnímání subjektivních barev lidmi s poruchou barvocitu, různé teorie s tím související. Dále byly stručně popsány nejvíce rozšířené teorie vysvětlující iluzi a vybrané matematické modely popisující vjem Benhamova klamu.

Praktická část práce se věnovala studiu vlivů změny podmínek při pozorování subjektivních barev. Byl zkoumán vliv intenzity a barvy osvětlení. Výzkum účinku intenzity prokázal soulad s předchozími studiemi. Prostředky studie byly limitované, v experimentu zaměřeném na barevné osvětlení bylo použito světlo o relativně širokém spektru, což mohlo ovlivnit výsledky. Změna pořadí subjektivních barev, jak jsou viděny na kotouči, pomocí světla o různých vlnových délkách se sice jeví jako nepravděpodobná, za lepších podmínek by ale šla lépe posoudit. Zmíněné změny v pořadí subjektivních barev bylo dosaženo jinou cestou, změnou směru rotace disku. Cílem práce bylo také stanovit mezní rychlost rotace, při které subjektivní barvy právě zmizí a byla stanovena dolní i horní mez pro oba směry otáčení. Bylo zjištěno, že nejen poloha prstenců v rámci bílé plochy pozadí ovlivňuje vnímaný odstín subjektivní barvy, ale celková bílá plocha před a za prstencem má také svůj podíl. Když se délka oblouků do určité míry zvětšuje, způsobuje to ztmavnutí dané subjektivní barvy. Pokud ale prstenec překročí určitou hranici, pravděpodobně vyvolá jinou subjektivní barvu než jeho kratší provedení. Předmětem dalšího zkoumání by mohlo být například objevení této hranice. Vzdálenost prstenců od středu kotouče nepůsobí dle výsledků této studie na vjem subjektivních barev, ale čím je tloušťka oblouku větší, tím menší je vjem subjektivní barvy. Prstenec se jeví uvnitř bezbarvý a subjektivní barva tvoří pouze jeho lem.

Toto bylo potvrzeno zejména pro oblouk vyvolávající teplý odstín (nejčastěji oranžovou). U ostatních prstenců, respektive odstínů dochází pravděpodobně k problému s odlišením barvy od šedé nebo černé. Barvy jsou často popisovány jako šedozelená nebo tmavě modrá až černá. Proto se na těchto širokých prstencích špatně rozlišuje okraj a vnitřní bezbarvá část.

Práce si dala za úkol zpřesnit či ověřit některé dosud známé poznatky o Benhamově iluzi, což se podařilo. Přesný mechanismus vzniku Benhamovy iluze není stále znám, ale jeho odhalení nebylo v kompetenci této práce, jelikož pravděpodobně spadá do oboru neurooftalmologie. Další zkoumání tohoto zrakového klamu může vést zejména k odhalení mechanismu zpracování barev lidským zrakovým systémem, například pomocí osob s poruchou barvocitu. U jednoho probanda bylo ověřeno, že subjektivní barvy vidí i lidé s poruchou barvocitu, avšak jinak než lidé s normálním barvocitem. Stále však nelze s určitostí říci, jestli Benhamova iluze vytváří pro barvoslepého člověka nové barvy nebo jestli se jedná o stejné odstíny, které vyvolávají i běžné nehybné podněty. Pokud by se našlo větší množství osob s podobnou poruchou barvocitu, mohla by být předmětem dalšího zkoumání tato problematika.

## LITERATURA

1. KVAPILÍKOVÁ, K. *Anatomie a embryologie oka*. Brno : Národní centrum ošetrovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, 2010. ISBN 80-7013-313-9.
2. TUNNACLIFFE, A. H. *Introduction to visual optics*. London : The Gresham Press, 1993. ISBN 0-9009-928-3.
3. ČIHÁK, R. *Anatomie 3*. Praha : Grada Publishing, 1997. ISBN 80-7169-140-2.
4. TROJAN, S. et al. *Lékařská fyziologie*. 4. přepracované vydání. Praha : Grada Publishing, 2003. ISBN 80-247-0512-5.
5. ŠIKL, R. *Zrakové vnímání*. 1. vyd. Praha : Grada Publishing, 2012. ISBN 978-80-247-3029-5.
6. ŠTIKAR, J. *Obrazová komunikace*. 1. vyd. Praha : Karolinum, 1992. ISSN 0567-8307.
7. PLUHÁČEK, F. *Barva, její vnímání a měření* – výukové materiály k předmětu Fyziologická optika, Katedra optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, Olomouc, 2011.
8. AUTRATA, R. a VANČUROVÁ, J. *Nauka o zraku*. 1. vyd. Brno : Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví v Brně, 2002. ISBN 80-7013-362-7.
9. TANABE, H. C. et al. *Neural Correlates and Effective Connectivity of Subjective Colors during the Benham's Top Illusion: A Functional MRI Study*. Cerebral Cortex. 2011, 21, stránky 124–133.
10. ROZSÍVAL, P. et al. *Oční lékařství*. 1. vyd. Praha : Karolinum, 2006. ISBN 80-7262-404-0.
11. COHEN, J. a GORDON, D. A. *The Prevost-Fechner-Benham subjective colors*. Psychological Bulletin. 1949, 46, č. 2, stránky 97–136.
12. BACH, M. *Benham's Top*. Visual Phenomena and Optical Illusions. [Online] 03. 09 2002. [Citace: 16. 02 2016.] <http://www.michaelbach.de/ot/col-Benham/index.html>.
13. VON CAMPENHAUSEN, CH. a SCHRAMME, J. *100 years of Benham's top in colour science*. Perception. 1995, 24, stránky 695–717.

14. CHUDLER, E. H. *Benham's Disk*. Neuroscience for kids. [Online] [Citace: 17. 02 2016.] <http://faculty.washington.edu/chudler/benham.html>.
15. LIVEING, G. D. *The Artificial Spectrum Top*. Nature. 27. 12 1894, 51, str. 200.
16. BIDWELL, S. *On subjective colour phenomena attending sudden changes of illumination*. Proceedings of the Royal Society of London. 1896, 60, stránky 368–377.
17. BENHAM, C. E. *The Benham Top*. Nature. 16. 9 1909, 81, str. 335.
18. FESTINGER, L., ALLYN, M. R. a WHITE, CH. W. *The perception of color with achromatic stimulation*. Vision Research. 1971, 11, stránky 591–612.
19. BAGLEY, F. W. *An investigation of Fechner's colors*. American Journal of Psychology. 1902, 13, stránky 488–525.
20. EDRIDGE-GREEN, F. W. *The Artificial Spectrum Top*. Nature. 31. 01 1895, 51, str. 321.
21. ALLEFELD, C. et al. *Flicker-light induced visual percepts: Frequency dependence and specificity of whole percepts and percept features*. Consciousness and Cognition. 2010.
22. ABNEY, W. de W. *The Artificial Spectrum Top*. Nature. 1895, 51, č. 1317, str. 292.
23. VIÉNOT, F. a LE ROHELLEC, J. *Reversal in the Sequence of the Benham Colours with a Change in the Wavelength of Illumination*. Vision Research. 1992, 32, č. 12, stránky 2369–2374.
24. KARVELLAS, P. C. et al. *Hue reversal in the Fechner-Benham color effect following white light adaptation*. Vision Research. 1979, 19, stránky 1277–1279.
25. FINNEGAN, J. M. a MOORE, B. *The Artificial Spectrum Top*. Nature. 24. 01 1895, 51, stránky 292–293.
26. HEINZOVÁ, R. *Zrakové klamy: bakalářská práce*. Olomouc : Univerzita Palackého, Přírodovědecká fakulta , 2014.
27. WHITE, CH., LOCKHEAD, G. R. a EVANS, N. J. *Multidimensional scaling of subjective colors by color-blind observers*. Perception and Psychophysics. 1977, 21, č. 6, stránky 522–526.
28. KRANTZ, J. H. *Fechner's Colors and Benham's Top*. Encyclopedia of Color Science and Technology. Berlin Heidelberg : Springer, 2013.

29. SCHRAMME, J. *Changes in Pattern Induced Flicker Colors are Mediated by the Blue-Yellow Opponent Process*. Vision Research. 1992, 32, č. 11, stránky 2129–2134.
30. GRUNFELD, E. D. a SPITZER, H. *Spatio-temporal Model for Subjective Colours Based on Colour Coded Ganglion Cells*. Vision Research. 1995, 35, č. 2, stránky 275–283.
31. KENYON, G. T. et al. *A theory of the Benham Top based on center-surround interactions in the parvocellular pathway*. Neural Networks. 2004, 17, stránky 773–786.
32. LE ROHELLEC, J. a VIÉNOT, F. *Interaction of Luminance and Spectral Adaptation upon Benham Subjective Colours*. Color Research & Application. 2001, 26, stránky 174–179.
33. NISHIYAMA, Y. *Benham's Top*. Osaka Keidai Ronshu. 2012, 65, č. 6, stránky 87–93.